SCIENCES ET AVENIR

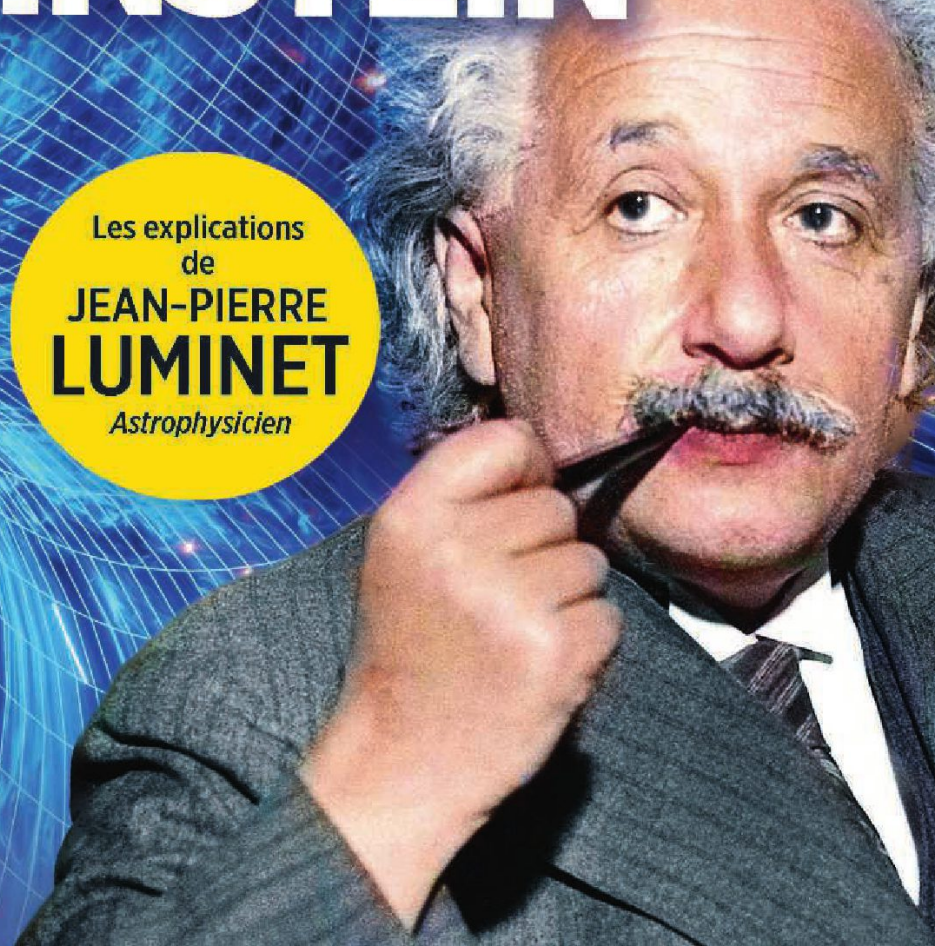
ULCÈRES
La bactérie qui attaque l'estomac
p.60

• Quantique • Trous noirs • Ondes gravitationnelles...

LES GÉNIALES "ERREURS" D'EINSTEIN

p.28

Les explications de
JEAN-PIERRE LUMINET
Astrophysicien



©DA ARCHIVIO/OPALE/ALIAXSANDR/SHUTTERSTOCK/PHOTOPHOTOMONTAGE SETA

NOVEMBRE 2025 - N° 945 - BEL 5,70 € - LUX 5,70 € - CH 9,50 FS - D / AUT 15,70 € - ESP 5,70 € - GR 5,70 € - PORT CONT 5,70 € - DOM 5,90 € - MAL 800 XPF - MAR 65 MAD - TUN 17 TND - CAN 6,20 $CAD

L 13418 - 946 - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR - N° 946 - DÉCEMBRE 2025 - LES GÉNIALES ERREURS D'EINSTEIN

ŠKODA

Conçues pour tout.
Même conduire.

A 0 g CO_2/km
B
C
D
E
F
G

www.skoda.fr

Volkswagen Group France – SAS - Capital : 198 502 510 € – 11, av. de Boursonne – 02600 Villers-Cotterêts – RCS Soissons 832 277 370.

Pensez à covoiturer **#SeDéplacerMoinsPolluer**

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

L'éclat du doute

Einstein avait (parfois) tort. Et c'est pour cela qu'il reste, encore aujourd'hui, le plus grand des physiciens. À mesure que se referme cette « année Einstein », le moment est venu de rendre hommage à l'homme derrière la légende : non pas une figure figée dans le marbre des certitudes, mais un esprit libre capable de remettre en cause ses propres dogmes. *« Einstein me fit remarquer que l'introduction de la constante cosmologique avait été la plus grosse "bourde" [blunder] de toute sa vie. Mais cette "bourde" est encore utilisée par les cosmologistes aujourd'hui. »* Voici ce qu'écrivait en 1970 George Gamow dans son autobiographie *My World Line*. Même si d'aucuns suggèrent que cette anecdote, dont il n'existe aucune autre trace écrite, a été quelque peu enjolivée, il ne fait guère de doute que le célèbre physicien avait introduit ce terme pour de mauvaises raisons *(p. 34)*. Pourtant, la fameuse constante cosmologique permit de décrire 70 ans plus tard l'énergie noire, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Même malgré lui, « *Einstein avait encore raison !* »

C'est l'un des paradoxes du génie d'Einstein : ses errements sont aussi féconds que ses fulgurances

C'est là l'un des paradoxes du génie : ses errements sont aussi féconds que ses fulgurances. Dans ce dossier exceptionnel, nous explorons ses grandes « erreurs », des plus célèbres aux plus méconnues. Loin de diminuer son œuvre, elles en dessinent les marges fertiles. Comme le dit Jean-Pierre Luminet, *« les candidats ne manquent pas pour accomplir son rêve inassouvi » (p. 39)*, celui d'une théorie unifiée des forces de la nature. Relire Einstein à l'aune de ses doutes, c'est aussi rappeler l'importance de l'erreur dans la démarche scientifique. Une importance que nos sociétés, saturées de résultats immédiats et d'« expertises » définitives, peinent à reconnaître. Pourtant, *« craindre l'erreur et craindre la vérité est une seule et même chose »*, écrivait le mathématicien Alexandre Grothendieck *(p. 30)*. Einstein incarne mieux que quiconque l'éclat du doute. ■

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233.304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32 Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52 Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31 Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (environnement, évolution) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueur Jean-Gabriel GANASCIA
Ont participé à ce numéro : J. BOUGHON, A. CARLIEZ, A. DAVID, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, I. KIRIOW, A. PAGÈS, É. PROUMEN, A. VERNET, N. SCHEIDHAUER
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Creatoprint
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Émilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement: Yasmina FERHAT - 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 % Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte : une lettre Sciences et Avenir « bienvenue aux abonnés » posée sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ainsi qu'un message « Les Restos du Coeur» posé sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0225 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

CCF
BANQUE

CEUX QUI COMPTENT POUR VOUS

peuvent aussi compter sur nous

Au Crédit Commercial de France, nos conseillers ont à cœur de mettre leur expertise au service de nos clients mais aussi de leur famille **afin d'accompagner chaque membre dans leurs projets personnels.**

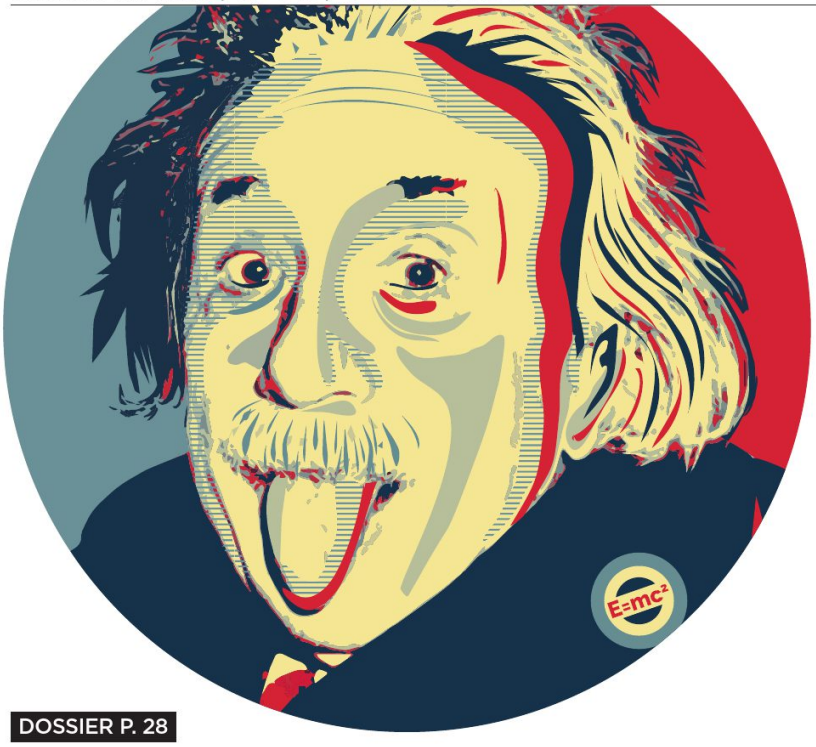
Rendez-vous dès maintenant **en agence** ou sur **ccf.fr**

CCF | BANQUE PATRIMONIALE DEPUIS 1917

CCF - S.A. au capital de 147 000 001 euros, agréée en qualité d'établissement de crédit et de prestataire de services d'investissement, immatriculée au RCS de Paris sous le numéro 315 769 257 - Siège social : 103 rue de Grenelle - 75007 Paris. Intermédiaire en assurance immatriculé à l'ORIAS sous le numéro 07 030 182 (www.orias.fr).

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 946 / Décembre 2025



DOSSIER P. 28

Les géniales erreurs d'Albert Einstein

70 ans après son décès, retour sur l'incroyable destin de ce génie de la physique. Un esprit anticonformiste dont les erreurs ont presque toujours été fécondes, car elles ont ouvert la voie aux grandes avancées d'aujourd'hui.

P. 50

Biodiversité : faut-il craindre une extinction de masse ?

La biodiversité est menacée par l'activité humaine. Mais l'extinction d'une espèce n'est pas aisée à établir. Explications.

P. 60

Ulcères : le combat contre « Helicobacter pylori »

Cette bactérie présente dans l'estomac est responsable de troubles gastriques qui peuvent évoluer en ulcère ou cancer.

P. 76

Fossiles : les révélations de l'ambre libanais

Des paléontologues scrutent l'ambre à la recherche de fossiles piégés dans cette résine issue des conifères. Reportage.

3 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

6 **ACTUALITÉS** Sous nos pieds, les traces d'une Terre disparue / Une exolune pourrait être super-volcanique

26 **Journal de l'IA : L'IA, éloquente mais peu laborieuse**

42 **Dans les villes vertes et intelligentes de demain**

46 **Avec les limiers du traçage de la cocaïne**

NATURE

10 **ACTUALITÉS** Une vague record mesurée par satellite / Le transport aérien va carburer au biokérosène

50 **Biodiversité : faut-il craindre une nouvelle extinction de masse ?**

55 **La haute mer a enfin son cadre juridique**

58 **Coup de chaud sur le vignoble bordelais**

SANTÉ

16 **ACTUALITÉS** Une première neurostimulation contre la DMLA / Les cheveux gris, mécanisme de défense contre le cancer

60 **Ulcères de l'estomac : le combat contre « Helicobacter pylori »**

68 **L'appétit a un interrupteur cérébral**

70 **Ralentir la neurodégénérescence grâce à la lumière**

74 **Nutrition : Cocktail de fruits exotiques**

HISTOIRE

20 **ACTUALITÉS** Une entrée secrète dans la pyramide de Mykérinos ? / Faire marcher les moais de l'île de Pâques

76 **Fossiles : les révélations de l'ambre libanais**

82 **Le petit tyrannosaure n'en était pas un**

84 **Histoire des sciences : La mobilisation des femmes pour le végétarisme**

RENDEZ-VOUS

88 **Sélection livres : spécial fêtes**

92 **Expositions**

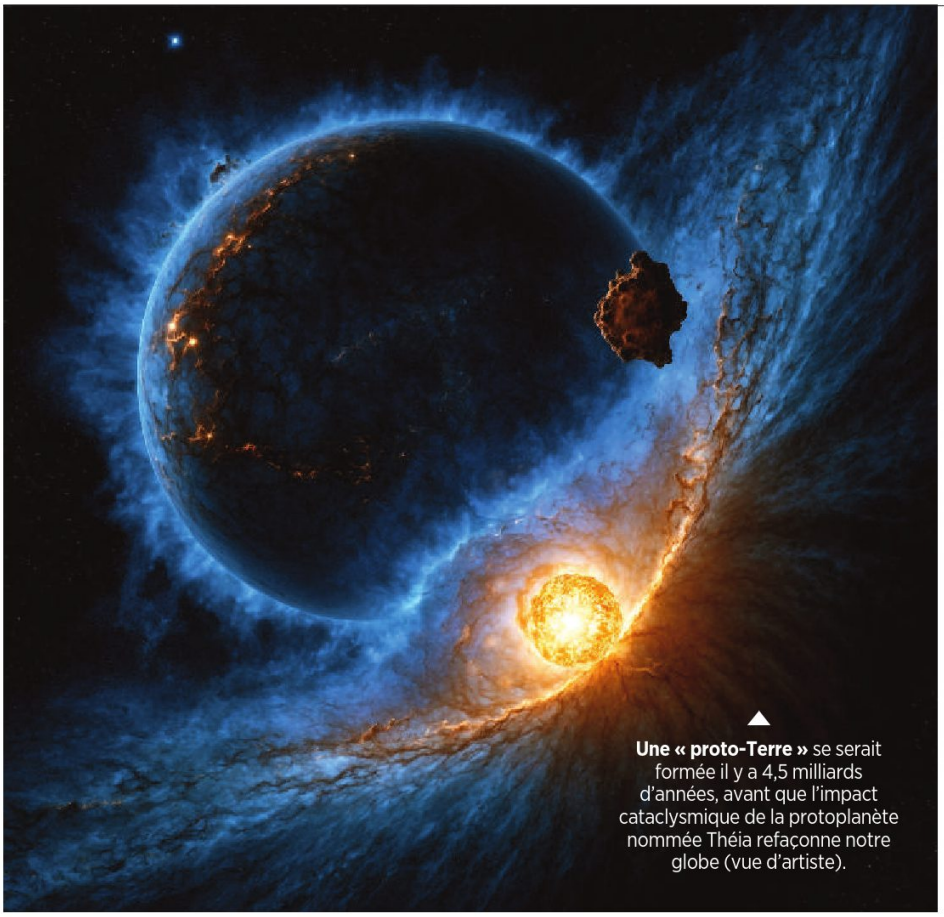
94 **Questions de lecteurs**

95 **Courrier**

96 **Le ciel de décembre**

98 **À retrouver sur le Web**

MEHDI BENYEZZAR (SOURCE ROGER VIOLLET) - JEAN-BAPTISTE STROBEL / BIOSPHOTO - SPL/ SUCRÉ SALÉ - DANY AZAR



MARK PATERNOSTROS / SPL / SUCRÉ SALÉ

Une « proto-Terre » se serait formée il y a 4,5 milliards d'années, avant que l'impact cataclysmique de la protoplanète nommée Théia refaçonne notre globe (vue d'artiste).

Sous nos pieds, les traces d'une Terre disparue

Des chercheurs ont analysé des roches très anciennes ou issues du manteau profond, qui enferment des vestiges chimiques de la « proto-Terre ».

Une équipe internationale a annoncé la découverte de vestiges chimiques de la « proto-Terre », un monde vieux de 4,5 milliards d'années. La Terre primitive s'est d'abord formée à partir de la fusion de météorites, avant d'être remodelée, moins de 100 millions d'années plus tard, par l'impact cataclysmique d'un planétoïde de la taille de Mars, Théia. Cette collision, qui a donné naissance à la Lune, a aussi modifié la composition terrestre. Pour les géologues, les matériaux originels de la proto-Terre avaient alors irrémédiablement disparu.

Pourtant, une étude publiée dans *Nature Geoscience* indique avoir découvert des lambeaux de ce lointain passé. Pour cela, les chercheurs ont analysé des roches provenant d'Isua au Groenland, du bouclier canadien et de Kaapvaal en Afrique du Sud — des régions constituées de parties très anciennes et stables de la lithosphère continentale — et des basaltes remontant du manteau profond *via* les volcans de La Réunion et d'Hawaii.

L'élément clé de cette étude est le potassium, présent partout sur Terre sous trois variantes atomiques (39, 40 et 41). Si les proportions de ces isotopes sont stables dans les roches du manteau, elles sont différentes dans les météorites, ce qui fait de cet élément un marqueur intéressant pour identifier les matériaux primordiaux.

Un déficit anormal en potassium 40

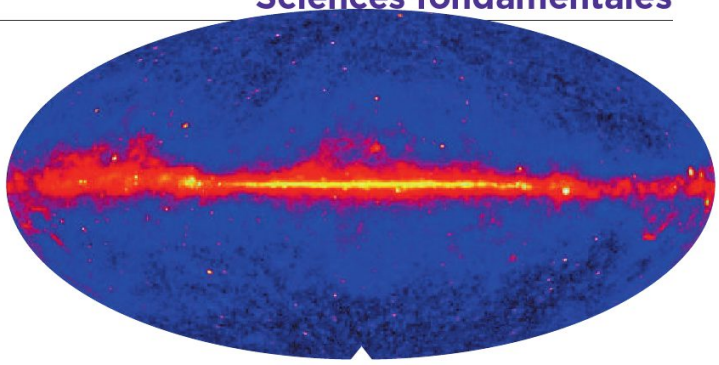
Or, les analyses en spectrométrie de masse ont mesuré un déficit anormal en potassium 40 dans certains échantillons. Cela ne peut être expliqué par les processus géologiques actuels, ni par les grands impacts météoritiques connus. Selon les chercheurs, cette signature correspond à des matériaux formés avant la grande collision avec Théia.

Pour tester leur hypothèse, ils ont simulé 4,5 milliards d'années d'évolution géologique et d'impacts météoritiques. Ils ont ainsi montré que l'impact géant a enrichi les roches terrestres en potassium 40. Celles qui en manquent doivent donc provenir d'un manteau antérieur à cet événement — autrement dit, d'une proto-Terre —, dont des vestiges subsisteraient dans des zones profondes et stables du manteau terrestre.

Étonnamment, la signature observée dans ces échantillons ne correspond à aucune météorite connue. Ce qui signifie que les matériaux météoritiques ayant formé la proto-Terre restent à découvrir. **S. R.**

Des indices de matière noire au centre galactique

Des sources de rayons gamma pourraient être la manifestation de cette matière cachée.



Le rayonnement gamma au centre de la Voie lactée a été détecté par le télescope spatial Fermi il y a une quinzaine d'années.

NASA/DOE/FERMI LAT COLLABORATION

La matière noire montre-t-elle enfin le bout de son nez ? De mystérieuses sources de rayons gamma observées au centre de notre galaxie pourraient être la manifestation de cette matière que l'on cherche désespérément depuis près d'un demi-siècle. La lueur a été détectée il y a une quinzaine d'années. Jusqu'à présent, on l'attribuait à d'anciens pulsars millisecondes, de minuscules étoiles à neutrons tournant à toute allure en émettant un rayonnement gamma intense. Mais une nouvelle étude démontre qu'elle pourrait aussi correspondre à l'auto-annihilation de particules de matière noire, les hypothétiques Wimps (Weakly interacting massive particles). Il reste à départager ces deux hypothèses. Pour cela, de prochains télescopes observeront cette lueur à plus haute énergie : si elle s'interrompt brusquement, ce sera une signature de la matière noire. Si elle se prolonge, les pulsars garderont la main. **F. N.**

EN DEUX MOTS

ISS Le 2 novembre dernier a marqué les 25 ans d'occupation continue de la Station spatiale internationale, que la Nasa prévoit de désorbiter vers 2030. **ESPACE** Pour la quatrième fois en 16 mois de service, la fusée Ariane 6 a réussi son décollage, plaçant en orbite le satellite d'observation de l'environnement Sentinel-1D. **IA** Plus de 700 scientifiques, personnalités politiques et entrepreneurs de la tech ont appelé à arrêter le développement d'une superintelligence artificielle capable de surpasser les capacités humaines.

VOLIRIS

Natac, une navette aérienne porte-conteneurs automatique

TRANSPORTS La société Voliris, associée à l'équipementier Michelin, développe une « navette aérienne de transport automatisé de conteneurs » afin de délivrer des charges lourdes dans des régions dépourvues d'infrastructures de transport. Livrée en kit pour être assemblée sur son site de départ, l'aile de 25 000 m³ segmentée en cinq lobes emportera jusqu'à 30 tonnes. Sa géométrie, et donc son volume, varie pour adapter sa portance selon l'altitude. Comparable à un téléphérique aérien programmable, elle assurera des trajets répétés sans équipage. **S. R.**

158 km/h
La vitesse des « diables de poussière » martiens

PLANÉTOLOGIE
L'analyse de données collectées pendant plus de vingt ans par les orbiteurs européens Mars Express et ExoMars a permis d'analyser plus de 1000 tourbillons de poussière, de les cartographier et de mesurer précisément leur vitesse. Bien supérieure aux 50 à 100 km/heure estimés jusqu'ici. **F. D.**

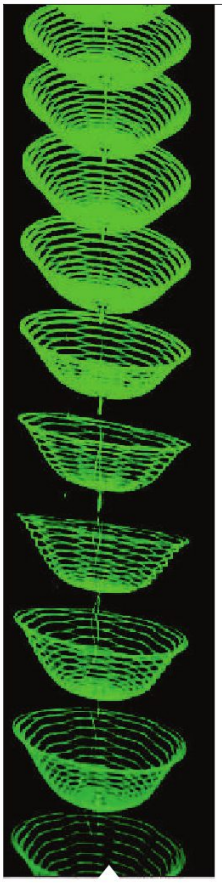
SOURCE : VALENTIN BICKEL, UNIVERSITÉ DE BERNE, SUISSE.

L'ordinateur quantique arrive (vraiment)

INFORMATIQUE
Le 23 octobre, la start-up française Quandela a livré au CEA son ordinateur quantique Lucy. Équipé de 12 qubits photoniques, il sera couplé au supercalculateur Joliot-Curie du Très Grand Centre de calcul (TGCC) pour explorer les calculs hybrides quantique-classique. Accessibles à une large communauté de chercheurs européens, ses premières applications viseront l'optimisation des réseaux énergétiques, la logistique, mais aussi la conception aérospatiale, les nouveaux matériaux ou l'intelligence artificielle… **F. N.**

G. MARTEL/CEA

Lucy est installé au Très Grand Centre de calcul du CEA, à Bruyères-le-Châtel.



D. LAMOUREUX ET AL.

La structure se déploie en forme de cloche inversée pour atterrir.

Un parachute lent inspiré du kirigami

INGÉNIERIE Une équipe, s'inspirant du kirigami — l'art japonais du découpage de papier —, a conçu un parachute dont la structure permet de ralentir la descente tout en obtenant une meilleure stabilité. Les motifs de la toile ainsi trouée la font se replier en forme de cloche inversée. De quoi rendre le largage de ravitaillement plus sûr et plus précis. **H. J.**

SOURCE : DANICK LAMOUREUX, POLYTECHNIQUE MONTRÉAL, CANADA.

IL A DIT

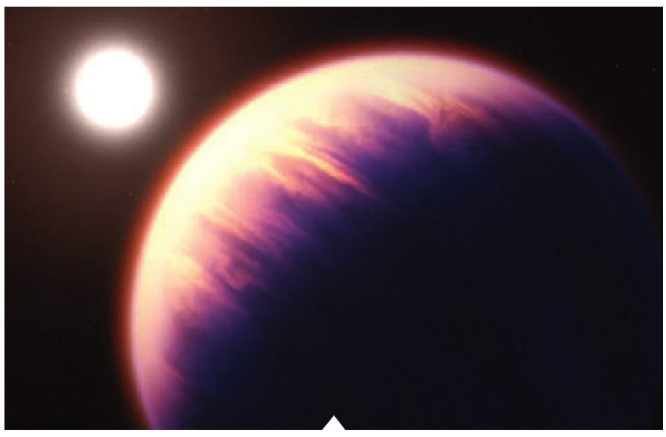
« C'est à peu près 300 jours dans le volume d'une Fiat 500 rien qu'à l'aller [...] Il n'y aurait absolument rien à faire [...] Une interminable attente »

Thomas Pesquet, astronaute, se montrant peu enclin à accepter une mission sur Mars à l'occasion de la sortie de son livre-entretien avec le physicien Étienne Klein : « Éloges du dépassement », chez Flammarion.

Une exolune pourrait être super-volcanique

Cet astre orbitant autour d'une exoplanète éjecterait des quantités très importantes de matières dans l'espace.

Le premier satellite d'une planète extrasolaire — appelé aussi « exolune » — a peut-être été découvert dans le voisinage de Wasp-39b, une exoplanète de type Jupiter chaud située à 700 années-lumière de la Terre. Plusieurs indices suggèrent l'existence d'un tel astre. En 2023, le télescope James-Webb avait détecté du dioxyde de soufre et du dioxyde de carbone dans l'atmosphère de Wasp-39b, d'autres instruments ayant décelé du sodium et du potassium. Après avoir analysé les variations de l'ensemble de ces substances sur plus d'une dizaine d'années, des astronomes américains soutiennent qu'elles ne proviennent pas de la planète elle-même… mais d'une lune volcanique orbitant autour ! Un satellite qui, à l'instar de Io (lune de Jupiter) dans notre système solaire, éjecterait des quantités très importantes de matières dans l'espace. Elles alimenteraient un nuage de gaz autour de la planète hôte qui retomberait épisodiquement dans son atmosphère. **F. D.**



NASA, ESA, CSA, JOSEPH OLMSTED (STSCI)

L'exoplanète géante Wasp-39b et son étoile hôte (vue d'artiste).

UNIVERSITY OF WATERLOO

Vue microscopique de cristaux liquides.

Des cristaux liquides pour muscles artificiels

ROBOTIQUE En intégrant des cristaux liquides dans un élastomère pour robots souples, des chercheurs ont créé un nouveau matériau permettant de garder la souplesse de leurs structures tout en les rendant jusqu'à neuf fois plus résistantes. Ces muscles artificiels élargissent les perspectives de la robotique souple, dont l'intérêt est d'offrir des interactions plus sûres que des machines rigides. **H. J.**

SOURCE : SAHAD VASANJI, UNIVERSITÉ DE WATERLOO, CANADA.

Aux origines de la Voie lactée, des planètes plus légères

ASTROPHYSIQUE Les planètes nées aux débuts de la Voie lactée avaient peu à voir avec celles d'aujourd'hui. Trois milliards d'années après la naissance de notre galaxie, le milieu interstellaire restait pauvre en éléments lourds (fer, nickel). Résultat : les premiers mondes auraient été plus légers, dotés d'un manteau épais et d'un cœur de fer réduit, tandis que les planètes plus récentes présentent des noyaux massifs et compacts. **F. N.**

SOURCE : JASON STEFFEN, UNIVERSITÉ DU NEVADA, ÉTATS-UNIS.

10 000

véhicules électriques... Et ce n'est que le début.

Amazon développe sa flotte de livraison pour atteindre 10 000 véhicules électriques en Europe, cette année.

amazon

25 ans que vous cliquez à la bonne porte.

Flotte désignant les véhicules électriques exploités par les partenaires de livraison d'Amazon dans l'UE et au Royaume-Uni. Pour plus d'informations, rendez-vous sur aboutamazon.fr/durabilité

Une vague record mesurée par satellite

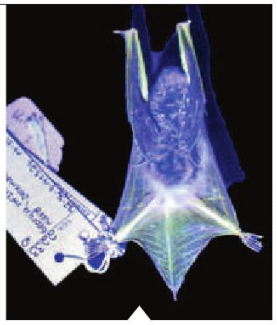
Détectée au cœur de la tempête Eddie, dans le Pacifique Nord en 2024, c'est la plus haute vague jamais mesurée depuis l'espace.

Le 21 décembre 2024, le satellite franco-américain Swot (Surface water and ocean topography) a enregistré dans le Pacifique Nord une vague colossale de 19,7 mètres, la plus haute jamais mesurée, a annoncé le Laboratoire d'océanographie physique et spatiale du CNRS. Soit un mur d'eau équivalent à un immeuble de sept étages ! Les vagues océaniques naissent du transfert d'énergie cinétique entre le vent et la surface de l'eau. Plus le vent souffle fort, longtemps et sur une grande distance, plus les vagues grandissent. Les plus hautes se forment lorsque les vents les plus forts ont la même vitesse de déplacement que les vagues. Cette synchronisation permet aux vagues de croître pendant plusieurs heures, concentrant une énergie phénoménale dans une zone de moins de 300 km de diamètre, avant de se disperser sous forme de houle dans tout l'océan.

Les houles ont parcouru 24 000 kilomètres

Les tempêtes mondiales sont classées depuis 1991 par ordre d'intensité, grâce à des modèles numériques de prévision météorologique. Si ces modèles indiquent qu'une vague record de 23 m s'est probablement élevée en janvier 2014 en Atlantique Nord, aucun des 15 satellites altimétriques qui se sont succédé en orbite de 1992 à 2024 n'avait mesuré de vague de plus de 18,5 m. De fait, le faisceau d'observation des satellites ne balaie à chaque passage qu'un fin ruban d'océan. Par chance, le satellite Swot, qui cartographie les niveaux d'eau et la topographie des océans avec une précision inédite, a survolé le cœur de la tempête Eddie au moment où la hauteur des vagues était proche du maximum. Les houles créées par cette grosse tempête ont parcouru plus de 24 000 km du Pacifique Nord jusqu'à l'Atlantique tropical, ont atteint des longueurs de 400 à 1600 m et fait déferler des vagues de 4 m sur les côtes d'Amérique du Sud. **S. R.**

BENOIT STICHELBAUT



BRIANA J. ROBERSON ET AL.

« Myotis austroriparius » émet une lumière verte sous UV.

Des chauves-souris qui brillent aux UV

CHIROPTÉROLOGIE
L'examen de 60 spécimens de chauves-souris conservés au musée d'Histoire naturelle de l'État de Géorgie (États-Unis) a révélé que six espèces ont la particularité de briller lorsqu'elles sont placées sous ultraviolets. Cette photoluminescence inexpliquée serait un héritage d'un ancêtre commun chez qui cette lueur remplissait peut-être une fonction à un moment donné de l'évolution. Mais impossible de dire laquelle à ce jour. **A.-S. T.**

SOURCE : BRIANA ROBERSON, UNIVERSITÉ DE GEORGIE, ÉTATS-UNIS.

2024, l'année la plus chaude depuis 125 000 ans

CLIMATOLOGIE Déjà déclarée année la plus chaude jamais enregistrée par l'Organisation météorologique mondiale, l'année 2024 et ses 15,1 °C de température moyenne mondiale aurait fait tomber un record datant de plus de 125 000 ans, selon une étude. Soit le pic de la dernière période interglaciaire, lorsque des variations naturelles de l'orbite et de l'inclinaison de la Terre avaient entraîné un réchauffement et une élévation du niveau de la mer de plusieurs mètres. **H. J.**

SOURCE : WILLIAM RIPPLE, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE L'OREGON, ÉTATS-UNIS.

L'ÉCOLE
des Arts
Joailliers

Avec le soutien
de Van Cleef & Arpels

Rêveries de pierres

Poésie et minéraux de Roger Caillois

MUSÉUM NAL HIST NATURELLE

Exposition

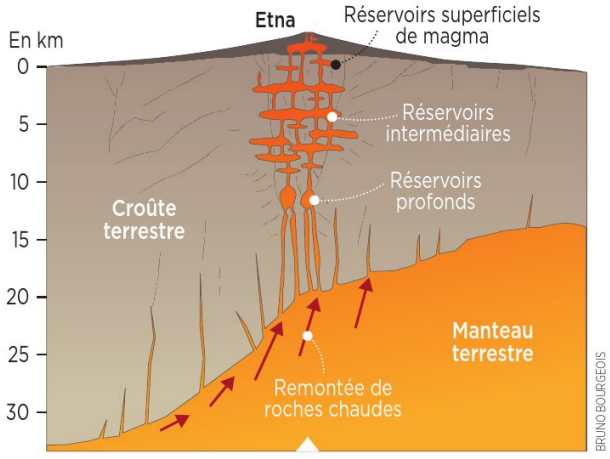
Entrée gratuite
16 bis boulevard Montmartre
75009 Paris

6 nov. 2025
29 mars 2026

Photo : François Farges

Des OGM pour préserver la biodiversité

GÉNÉTIQUE L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) a rejeté la demande d'un moratoire sur la libération d'espèces sauvages génétiquement modifiées et a voté pour reconnaître la biologie de synthèse comme un outil de préservation de la biodiversité. Ces motions permettront à l'UICN de fournir un cadre aux promoteurs de ces technologies visant des objectifs divers : éradication d'espèces invasives, immunisation d'espèces menacées par des maladies, ou résurrection d'animaux disparus. **A.-S. T.**



BRUNO BOURGEOIS

Représentation complète de la structure du volcan par les chercheurs.

Mieux prédire les éruptions de l'Etna à moyen terme

VOLCANOLOGIE En compilant les données du volcan sicilien Etna des 20 dernières années, des chercheurs italiens ont décrit une nouvelle méthode d'analyse des schémas sismiques correspondant à la recharge du magma du manteau, à son stockage à des profondeurs intermédiaires et à sa remontée à la surface avant l'éruption. De quoi permettre des prévisions des mois à l'avance, contrairement à l'observation actuelle des seuls mouvements du magma peu profond. **R. M.**

SOURCE : MARCO FIRETTO CARLINO, OBSERVATOIRE DE L'ETNA, ITALIE.

Le transport aérien va carburer au biokérosène

Depuis cette année, l'Union européenne impose à ses compagnies aériennes l'utilisation de biocarburant dans leur consommation de kérosène.

ARTUR WIDAK / NURPHOTO / AFP

6 % du kérosène utilisé devra être durable en 2030.

En 2024, 192 700 tonnes de kérosène d'origine biologique ont été livrées aux compagnies aériennes. C'est peu au regard des 32,1 millions de tonnes de carburant fossile consommées l'an dernier. Mais pour l'Union européenne, ce chiffre (0,6 %) constitue une première marche vers la décarbonation totale du transport aérien. Selon le règlement de l'UE, 6 % du kérosène devra être durable en 2030. Aujourd'hui, ce carburant provient à 81 % du recyclage des huiles de cuisson usagées et à 17 % de graisses animales. Demain, devraient s'y ajouter les produits des « cultures intermédiaires à vocation énergétique » (Cive) comme la moutarde, la phacélie ou le pois fourrager. Mais aussi les « e-carburants », cette recombinaison d'hydrogène issu d'énergies renouvelables et de CO_2, dont la production industrielle devrait démarrer d'ici à 2030. En 2050, les 350 compagnies œuvrant en Europe devront utiliser 70 % de carburants renouvelables. **L. C.**

1,5 %

La part d'énergies renouvelables provenant des pétroliers

ÉNERGIE Contrairement à leurs déclarations publiques en faveur de la transition énergétique, les 250 principales compagnies pétrolières et gazières possèdent moins de 1,5 % de la capacité mondiale de production d'énergie renouvelable. C'est ce qui ressort de l'analyse des registres de propriétés de 53 000 projets éoliens, solaires, hydro-électriques et géothermiques dans le monde. **H. J.**

SOURCE : A. BONTEMPI, UNIVERSITÉ AUTONOME DE BARCELONE, ESPAGNE.

SHUTTERSTOCK

Le dispositif, à base de fibres de carbone, capture le CO_2.

Un nouveau filtre à air vise à transformer les bâtiments en puits de carbone

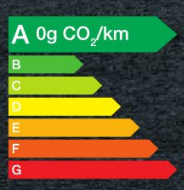
INGÉNIERIE Il pourrait s'adapter aux systèmes de ventilation des habitations et bureaux du monde entier : un nouveau filtre à air, composé de nanofibres de carbone recouvertes d'un polymère de polyéthylèneimine, formerait une éponge efficace à 92 % pour capturer les molécules de CO_2 présentes dans l'air. Le dispositif peut être nettoyé par chauffage solaire. **R. M.**

SOURCE : RONGHUI WU, UNIVERSITÉ DE CHICAGO, ÉTATS-UNIS.

Nouveau
Citroën ë-C5 Aircross

à partir de 454 €/mois(1)

sans apport. LLD 48 mois/40 000 km
prime CEE de 3 440 € déduite*
4 ans d'entretien et d'assistance**



JUSQU'À 8 ANS CITROËN WE CARE GARANTIE

Modèle présenté : Nouveau ë-C5 Aircross électrique 210ch, boîte automatique, autonomie confort, MAX, avec options Teinte Vert Astoria Toit Noir Perla Nera ouvrant panoramique à 587 €/mois, aux mêmes conditions. (1) Exemple pour une Location Longue Durée sur 48 mois et 40 000 km d'un Nouveau ë-C5 Aircross électrique 210ch, autonomie confort, YOU neuf, hors option après déduction de la Prime CEE de 3 440 €. Voir conditions d'éligibilité sur citroen.fr. Montants exprimés TTC. Offre non cumulable valable jusqu'au 30/11/25 réservée aux personnes physiques éligibles pour un usage privé, dans le réseau Citroën participant, et sous réserve d'acceptation par CREDIPAR, dénomination commerciale Stellantis Finance & Services, SA au capital de 138 517 008 € - 317 425 981 RCS Versailles – 43 rue Jean Pierre Timbaud 78300 Poissy - N° ORIAS : 07 004 921 (www.orias.fr). *Prime CEE pour la valorisation des opérations au titre du dispositif des Certificats d'économies d'énergie : 3 440 € non soumis à la TVA. (n° SIREN CEE : 798 641 999). Montants exprimés TTC et hors prestations facultatives. **Prestation facultative, contrat Entretien Plus comprenant l'entretien et l'assistance selon conditions contractuelles sur 48 mois / 40 000 km (20 €/ mois) (au 1er des 2 termes atteint). Les conditions générales de l'offre sont disponibles dans le réseau Citroën. Citroën WeCare : conditions sur citroen.fr.

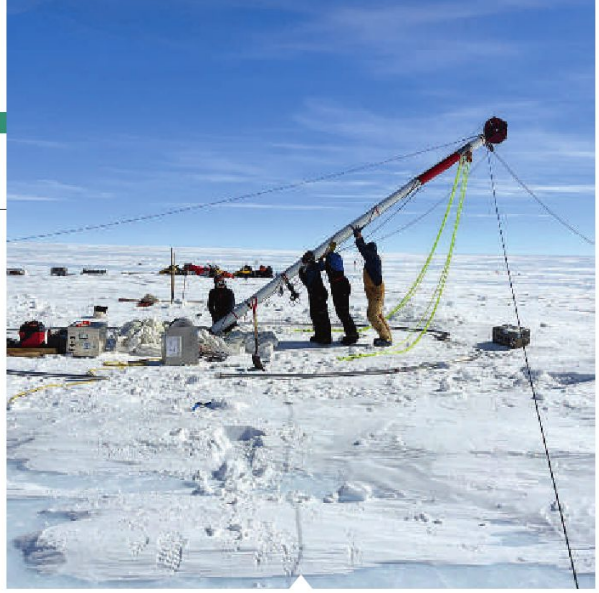
CITROËN

AUTOMOBILES CITROËN : RCS PARIS 642 050 199

Pour les trajets courts, privilégiez la marche ou le vélo. #SeDéplacerMoinsPolluer

Une carotte de glace témoin d'une Terre plus chaude

Le plus ancien échantillon de glace jamais obtenu offre une fenêtre inédite sur le climat de la Terre au miocène et au pliocène, lorsque les températures étaient plus élevées.



JULIA MARKS PETERSON, COLDEX.

Le prélèvement a été effectué dans la région d'Allan Hills, dans l'est de l'Antarctique, à une profondeur de 100 à 200 mètres.

Six millions d'années : c'est l'âge de la carotte de glace la plus ancienne jamais obtenue. Prélevée dans la région d'Allan Hills, en Antarctique oriental, par une équipe américaine affiliée au Center for oldest ice exploration, elle permettra d'en savoir plus sur le climat de la Terre au miocène et au pliocène, des périodes durant lesquelles les températures et les niveaux marins étaient bien plus élevés qu'aujourd'hui. *« Les carottes de glace sont comme des machines à remonter le temps qui permettent aux scientifiques d'observer à quoi ressemblait notre planète dans le passé »*, a expliqué Sarah Shackleton, glaciologue codirectrice de l'étude publiée dans la revue *Pnas*. Un saut dans le temps impressionnant dans ce cas, puisque le plus ancien échantillon prélevé ne remontait qu'à 1,2 million d'années. Les recherches en cours visent à reconstituer les niveaux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et la chaleur contenue dans les océans, qui ont des implications importantes pour la compréhension des causes du changement climatique naturel. **M. B.**

ÁNGEL HIDALGO GARRIDO

À VOIR SUR LE NET

Un rarissime lynx blanc filmé en Espagne

BIODIVERSITÉ Un photographe amateur espagnol a eu la chance de pouvoir filmer un spécimen jamais observé de lynx ibérique… tout blanc. La femelle adulte est atteinte de leucisme, une mutation génétique empêchant la production de mélanine. Une rencontre d'autant plus improbable que la population de l'espèce, après s'être réduite à 94 individus en 2002, n'atteint pas 1000 spécimens aujourd'hui. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Les araignées décorent leur toile pour mieux se repérer

ARACHNOLOGIE Des simulations informatiques ont permis d'éclaircir l'énigme des *stabilimenta*, d'étranges structures parfois présentes sur les toiles d'araignée. En modifiant la tension des fils, ces ajouts — aussi appelés décorations — altèrent la propagation des vibrations et pourraient signaler ainsi plus précisément à l'arthropode où les proies viennent d'être piégées sur sa toile. L'hypothèse reste à confirmer. **A.-S. T.**

SOURCE : GABRIELE GRECO, UNIVERSITÉ SUÉDOISE DES SCIENCES AGRICOLES.

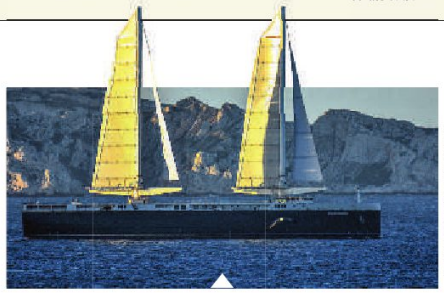
J. FREUND/NATUREPL/EBPHOTO

◀ **En forme de zigzag, la structure** pourrait aider l'araignée à repérer sa proie piégée sur la toile.

-90 %

La baisse des gaz à effet de serre dans l'UE en 2040

CLIMATOLOGIE
En marge de la COP30, organisée à Belém (Brésil) du 10 au 21 novembre, les ministres de l'Environnement de l'Union européenne se sont entendus sur l'objectif de réduire de 90 % les émissions de gaz à effet de serre en 2040 par rapport à 1990. Jusqu'ici, l'UE a réalisé -38 % en 35 ans. **L. C.**



GERARD BOTTINO / SOPA/SIPA

« Neoliner Origin » mesure 136 mètres de long.

Une transatlantique pour le plus grand cargo à voiles du monde

TRANSPORT Le plus grand cargo à voiles du monde a quitté le port de Saint-Nazaire le 15 octobre pour sa première traversée transatlantique à destination de Saint-Pierre-et-Miquelon (atteinte le 24 octobre) et Baltimore, aux États-Unis. Baptisé *Neoliner Origin*, le bâtiment peut embarquer jusqu'à 5300 tonnes de fret. Sa voilure de 3000 m^2 devrait permettre de baisser de plus de 80 % sa consommation de carburant. **S. R.**

Les rennes

du streaming

-5 €/mois
et par plateforme

Remise cumulable sur tous les abonnements Netflix, Disney+, Ligue 1+ et Apple TV.

Disponible avec l'offre Livebox Max.

Offre soumise à conditions, avec engagement 12 mois, valable en France métropolitaine sous réserve d'éligibilité, avec équipements compatibles. Valable pour les nouvelles souscriptions à compter du 20 novembre 2025. Livebox Max à 57,99 €/mois (prix hors remises et offres de remboursement en cours). Frais de mise en service : 49 €, et de résiliation : 60 €.

Souscription aux plateformes dans un délai de 3 mois suivant la mise en service de l'offre Livebox Max. Liste des plateformes disponibles susceptible d'évolution et sous réserve d'activation d'un compte. Plateformes : engagement mensuel et 12 mois possibles pour Ligue 1+. Détails sur orange.fr. Remise appliquée sur facture Orange. Perte de la remise en cas de résiliation après les 3 mois.

©2025 Disney et ses sociétés affiliées. The Family Plan 2 ©2025 Apple Video Programming LLC.

orange™
est là

Des mots croisés contre la démence

NEUROSCIENCES Faire des mots croisés ou avoir une activité artistique limite le risque de démence et de maladie d'Alzheimer, montre une grande étude menée sur douze ans. Ce résultat s'est maintenu en tenant compte du niveau socio-culturel, de l'état de santé, de facteurs génétiques et des activités antérieures des personnes suivies. Tout comme les relations sociales, un loisir stimulant les activités cognitives protège le cerveau d'une altération liée à l'âge. **P. K.**

SOURCE : THIBAULT MURA, UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER, FRANCE.

MAY / BSIP

Stimuler l'activité cognitive protège le cerveau.

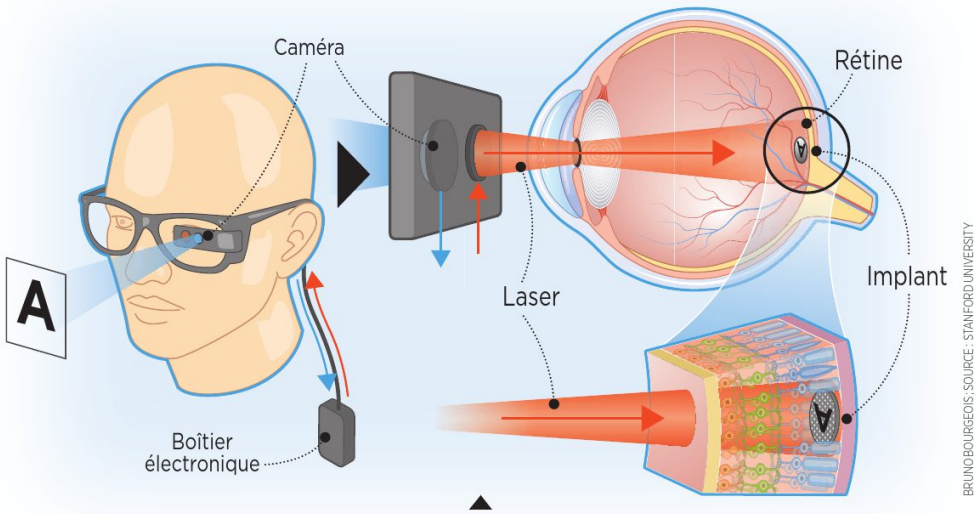
4 millions

Le nombre de fumeurs en moins en France en dix ans

ÉPIDÉMIOLOGIE De 12 millions en 2014, et malgré deux années de stagnation pendant la pandémie de Covid-19, le nombre de fumeurs quotidiens est passé à 8,4 millions en 2024, soit 17,4 % de la population adulte. L'étude de Santé publique France signale toutefois des inégalités socio-économiques : le tabagisme recule davantage dans les régions plus favorisées. **C. G.**

Une première neurostimulation contre la DMLA

Ce dispositif composé d'un implant rétinien et de lunettes émettant un rayon laser a permis à certains patients de retrouver une vision partielle.

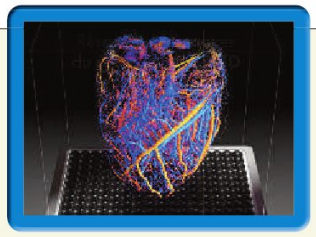


BRUNO BOURGEOIS ; SOURCE : STANFORD UNIVERSITY

La caméra sur les lunettes filme une scène. Dans un boîtier électronique, les images sont traitées par des algorithmes puis projetées au moyen d'un laser sur l'implant qui se substitue ainsi aux cellules photoréceptrices mortes.

Enfin un espoir face à la forme la plus fréquente de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), celle dite atrophique, ou sèche, contre laquelle aucun traitement n'est à ce jour disponible. La preuve vient d'être apportée par une étude internationale publiée dans la revue *New England Journal of Medicine*. Menée sur une trentaine de patients atteints de forme sévère, elle démontre que 80 % d'entre eux ont pu retrouver une vision partielle, soit la lecture d'au moins dix lettres supplémentaires dans le tableau de vision, grâce à un dispositif de neurostimulation sans fil.

38 patients ont été recrutés pour cet essai associant l'Institut de la vision (Inserm/CNRS/Sorbonne Université), la fondation Adolphe-de-Rothschild et l'hôpital national des Quinze-Vingts. La stratégie repose sur l'implant Prima, conçu à l'université Stanford (États-Unis) et développé par la société Science Corporation. Celui-ci a été glissé sous la rétine des patients après une minuscule incision. Composé d'une micropuce photovoltaïque de silicium, le petit carré de 2 millimètres de côté et de 30 micromètres d'épaisseur comporte 378 électrodes. Sa particularité est de pouvoir être relié sans fil à une caméra miniature placée sur une paire de lunettes de réalité augmentée et à un boîtier électronique. Celui-ci recevra les images filmées par la caméra avant de les convertir en flux vidéo projeté en temps réel sur l'implant rétinien par le biais d'un laser situé sur les lunettes. Finalement, le rôle de la puce de silicium revient à se substituer aux cellules photoréceptrices mortes, en transformant, au niveau de la rétine résiduelle, la lumière en signaux électriques communiqués au cerveau. Une commercialisation est attendue d'ici un à deux ans. **S. R.-M.**



A. DIZEUX, PHYSICS FOR MEDICINE/INSERM

À VOIR SUR LE NET

Des organes en 4D grâce aux ultrasons

IMAGERIE Une équipe française a mis au point une sonde à ultrasons permettant pour la première fois de visualiser l'appareil circulatoire (veines, artères, vaisseaux et système lymphatique) d'un organe entier à des échelles de moins de 100 micromètres. Une résolution en 3D inédite à laquelle s'ajoute la dimension temporelle permettant de suivre la dynamique des flux. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

IL A DIT

« Les vaccins à ARN sont des outils puissants pour reprogrammer la réponse immunitaire contre le cancer »

Adam Grippin, oncologue au centre anticancer MD Anderson (États-Unis), coauteur d'une étude montrant que les patients ayant reçu le vaccin à ARN contre le Covid-19 dans les 100 premiers jours après le début de leur immunothérapie ont vu leur espérance de vie presque doubler par rapport aux non-vaccinés (37,33 mois contre 20,6 mois).

Le cerveau dort littéralement debout

NEUROLOGIE L'examen à l'IRM de cerveaux de sujets privés de sommeil a révélé des flux de liquide céphalo-rachidien (dans lequel baigne notre cerveau) que l'on pensait réservés au sommeil. Chaque flux coïncidait avec une baisse de l'attention des sujets pouvant se produire jusqu'à toutes les 30 secondes chez les plus épuisés. Le diamètre des pupilles et les rythmes cardiaque et respiratoire baissaient aussi. *« C'est l'ensemble du corps qui entre dans un état de repos »*, décrit Laura Lewis, qui a dirigé ces travaux. **C. G.**

SOURCE : ZINONG YANG, MIT, ÉTATS-UNIS.

Un pas de plus vers des greffons universels

Une technique innovante a permis de transformer un rein initialement de type A en type O et à le greffer avec succès.

S'affranchir des règles de compatibilité d'organes dans les transplantations, tel est le message fort d'un travail canadien ayant réussi pour la première fois à transformer un rein initialement de type A en un type O et à le greffer. L'étude publiée dans la revue *Nature Biomédical Engineering* franchit ici une étape importante vers l'utilisation à terme d'organes « universels ». À ce jour, pour éviter les rejets, les transplantations doivent en effet impérativement respecter une règle dictée par les groupes sanguins. Or, les donneurs de type O, dits universels, sont les plus affectés car ils ne peuvent recevoir que des organes O. En plongeant ici un rein d'un donneur de type A dans un bain d'enzymes — déjà testé *in vitro* sur des poumons par une autre équipe de chercheurs —, la conversion en un rein de type O a fonctionné, permettant de tester la greffe chez un patient O en état de mort cérébrale. L'objectif était double : démontrer l'absence de rejet et aussi le bon fonctionnement de l'organe ; deux buts atteints en 48 heures. **S. R.-M.**

UBC

Le rein est placé avant la greffe dans un liquide contenant des enzymes de conversion.

PLAINPICTURE

Comment l'allaitement réduit le risque de cancer du sein

IMMUNOLOGIE La production de lait maternel est assurée par le développement lors de la grossesse d'un tissu mammaire spécialisé, ensuite remodelé et résorbé par des cellules immunitaires. Celles-ci persistent dans le tissu, ce qui diminue le risque du cancer du sein dit triple négatif, révèle une étude australienne. Cette découverte explique en partie pourquoi ce risque est plus réduit chez les femmes ayant eu des enfants, et plus encore si elles les ont allaités. **P. K.**

SOURCE : BALAJI VIRASSAMY, UNIVERSITÉ DE MELBOURNE, AUSTRALIE.

UTA

Cet assistant robotique souple fonctionnant à air comprimé permet de réduire la charge musculaire du bras.

Un exosquelette de coude prévient les troubles musculaires

BIOMÉCANIQUE Économie d'huile de coude en vue pour ceux dont le travail consiste à porter de lourdes charges de façon répétée. L'exosquelette souple à air comprimé mis au point par des ingénieurs américains permet de réduire l'activité musculaire du biceps de 22,36 % et du triceps de 18,19 %. Une assistance portable qui pourrait permettre d'atténuer le risque de troubles musculo-squelettiques liés au travail. **H. J.**

SOURCE : ESHWARA PRASAD SRIDHAR, UNIVERSITÉ DU TEXAS À ARLINGTON, ÉTATS-UNIS.

PLAINPICTURE

L'activité physique profite plus aux femmes qu'aux hommes

CARDIOLOGIE D'après une analyse des données de 85 000 personnes, les hommes devaient s'exercer 530 minutes par semaine pour réduire le risque de contracter une maladie coronarienne de 30 %, contre 250 minutes pour les femmes. Chez les personnes atteintes de cardiopathie coronarienne respectant les 150 minutes hebdomadaires recommandées, le risque de mortalité baissait trois fois plus chez les femmes ! Les différences hormonales et de structure musculaire pourraient expliquer cet écart. **C. G.**

SOURCE : JIAJIN CHEN, UNIVERSITÉ DE XIAMEN, CHINE.

546 000 Le nombre de décès annuels dus au changement climatique

ÉPIDÉMIOLOGIE Pour la première fois, les auteurs du rapport The Lancet Countdown, consacré aux effets sanitaires du changement climatique, ont chiffré le nombre de morts directement provoquées par la chaleur ces dernières années. Soit 546 000 décès en moyenne chaque année entre 2012 et 2021, principalement en Afrique, au Moyen-Orient et en Asie du Sud. H. J.

Les cheveux gris, mécanisme de défense contre le cancer

Une récente recherche sur les cellules souches montre qu'un cheveu peut perdre sa couleur pour éviter qu'une tumeur ne se développe.

Pour se protéger du cancer, certains cheveux « se sacrifient » en devenant gris. En effet, tout au long de la vie, nos cellules sont exposées à des facteurs qui peuvent endommager l'ADN et développer un cancer, y compris les cellules souches des cheveux. Ce sont elles qui produisent les mélanocytes qui colorent notre chevelure et nos poils. Mais quand une lésion à l'ADN s'avère trop sévère, ces cellules souches déclenchent un mécanisme et cessent de se différencier : plutôt arrêter d'être une cellule souche et mourir que de risquer un cancer. Sans sa cellule souche, le cheveu devient alors gris ou blanc. *« Le cheveu gris en lui-même ne protège pas du cancer. Mais il résulte d'un mécanisme qui se débarrasse des cellules très endommagées et potentiellement dangereuses »*, résume le Dr Yasuaki Mohri, de l'université de Tokyo (Japon), qui signe ces travaux.

PLAINPICTURE

Les chercheurs aimeraient maintenant savoir si cette réaction observée sur les cellules souches du cuir chevelu se retrouve également ailleurs dans l'organisme. Un « sacrifice » qu'accompliraient nos cellules en silence, sans même que nous nous en rendions compte. **C. L.**

Des chewing-gums pour dépister les pandémies

INFECTIOLOGIE Des chercheurs ont conçu une méthode de détection simple, intégrable dans un chewing-gum, pour faciliter le dépistage des maladies infectieuses — et éviter l'écouvillon dans le nez. Développée à partir du virus de la grippe, la technique repose sur la capacité d'une enzyme du virus à couper certaines molécules. De sorte que le chewing-gum change de couleur en cas d'infection détectée. N. G. C.

SOURCE : M. RASCHIG, UNIVERSITÉ DE WURTZBOURG, ALLEMAGNE.

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

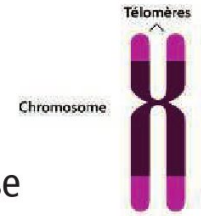
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

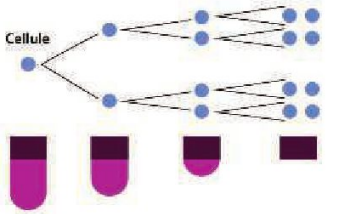
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

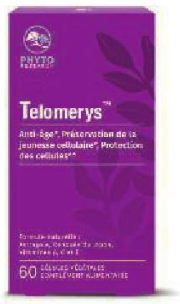
Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Telomerys™

Préservation de la jeunesse cellulaire

Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56



Des conseils ?
Les experts du laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 42 33 29** et sur www.telomerys.com

SCANPYRAMIDSPROJECT

Des mesures sont effectuées sur le parement en granite particulièrement poli de la façade orientale.

Une entrée secrète dans Mykérinos ?

Grâce à des méthodes non destructives, des chercheurs ont mis en évidence deux cavités derrière la façade est de Mykérinos, la plus petite des trois pyramides de Gizeh au Caire.

Voilà maintenant dix ans que, dans le cadre du projet ScanPyramids, des égyptologues du monde entier tentent de percer les secrets des grandes pyramides sans les endommager. Dernière avancée en date : la mise en évidence de deux cavités dissimulées derrière la façade est de Mykérinos, la plus petite des trois pyramides de Gizeh qui se dresse à environ 65 mètres de hauteur.

Les chercheurs s'interrogeaient depuis quelque temps sur un parement en blocs de granite particulièrement polis. Et pour cause : un tel polissage, observé ici sur une zone d'environ 4 m de haut sur 6 m de large, n'est visible que sur l'entrée nord existante. C'est pourquoi l'archéologue indépendant Stijn van den Hoven avait émis en 2019 l'hypothèse qu'il pouvait s'agir d'un second accès à l'intérieur de l'édifice.

Définir la nature exacte des vides détectés

L'équipe de ScanPyramids a enfin pu tester cette hypothèse en appliquant un triptyque de méthodes non destructives : tomographie par résistivité électrique (ERT), radar à pénétration de sol (GPR) et ultrasons (UST). Plusieurs « images » du sous-parement de la façade est, obtenues grâce à un procédé de fusion d'images et une corrélation de données, ont ainsi montré que deux vides remplis d'air étaient bel et bien présents derrière le parement extérieur, à respectivement 1,4 m et 1,13 m de profondeur, et mesurant 1 m de haut sur 1,5 m de large pour l'un et 0,9 m sur 0,7 m pour l'autre.

« L'hypothèse d'une entrée est très plausible et nos résultats nous rapprochent largement de sa confirmation », a affirmé le Pr Christian Grosse, membre de l'équipe, dans un communiqué. Mais les chercheurs insistent sur le fait que d'autres investigations seront nécessaires pour définir la nature exacte de ces vides : s'agit-il d'un corridor, d'une salle, ou simplement d'un espace de construction ? **Marine Benoit**

La première inscription assyrienne retrouvée à Jérusalem

ARCHÉOLOGIE Au pied du mont du Temple, à Jérusalem, des archéologues ont mis au jour un sceau d'argile vieux de 2700 ans portant une inscription en cunéiforme assyrien. Il s'agit de la première preuve matérielle d'un échange administratif entre l'Empire assyrien et le royaume de Juda, à une époque où ce dernier, après la chute du royaume d'Israël au nord vers 722 avant notre ère, devient un État vassal de l'Assyrie. Le contenu du fragment évoque d'ailleurs une exigence de paiement dans un délai précis. **M. B.**

E. YANNAI, CITY OF DAVID FOUNDATION

Une écriture en cunéiforme assyrien est visible sur le fragment de poterie.

ELLE A DIT

« Les bâtisseurs incas étaient d'une grande sophistication en matière d'architecture sonore, et s'inscrivent dans une longue et riche tradition d'ingénierie acoustique »

Stella Nair, professeure à l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis). L'étude d'un édifice inca connu sous le nom de *carpa uasi*, situé dans le Pérou actuel, montre qu'il aurait été conçu au milieu du XVe siècle principalement pour amplifier le son et la musique.

“Les pauvres sont des gens comme *nous*, sauf qu’ils n’ont pas *d’argent.*”

Coluche

LES RESTAURANTS DU CŒUR

LES RELAIS DU CŒUR

JE FAIS UN DON

©Gaston Bergeret

F. GARDY/INSTITUT PASTEUR

QUESTIONS À

Nicolás Rascovan

Responsable de l'unité de paléogénomique microbienne à l'Institut Pasteur de Paris

Le scénario sanitaire de la retraite de Russie

L'analyse génétique de restes de soldats de l'armée napoléonienne morts lors de la retraite de Russie en 1812 confirme un contexte sanitaire désastreux au sein de la Grande Armée.

Qu'avez-vous trouvé ?
L'analyse métagénomique des dents de 13 soldats exhumés d'une fosse commune de Vilnius (Lituanie) nous a permis d'identifier deux pathogènes qu'on n'attendait pas : *Salmonella enterica* et *Borrelia recurrentis*, respectivement responsables de la fièvre entérique et de la fièvre récurrente.

En quoi est-ce une surprise ?
Nous n'avons pas trouvé trace de typhus, pourtant le plus cité par les témoignages, et alors qu'en 2006, une étude sur 35 autres corps de la même fosse avait identifié le pathogène associé à cette maladie. Mais nous avons utilisé des techniques différentes sur des corps différents.

Quelle conclusion en tirer ?
Entre l'étude de 2006 et la nôtre, quatre pathogènes ont été identifiés à partir de 48 individus. Un échantillon trop réduit pour dire que telle ou telle maladie a eu un rôle prépondérant dans le désastre militaire. En revanche, on est sur un scénario sanitaire déplorable au cours duquel les soldats étaient en train de mourir de plusieurs maladies.

Propos recueillis par H. J.

TU GRAZ 2023

Situés au Népal, les bâtiments exposés notamment aux séismes ont été reconstitués numériquement.

Des monastères bouddhistes préservés en 3D

PATRIMOINE Des chercheurs de l'université technologique de Graz (Autriche) ont cartographié et reconstruit numériquement les monastères bouddhistes centenaires de la région himalayenne du Dolpo, au nord-ouest du Népal. C'est le premier inventaire complet de ces structures religieuses exposées depuis leur construction aux tremblements de terre, aux glissements de terrain et, plus récemment, au changement climatique et au développement d'infrastructures. Un tel besoin est apparu clairement après le tremblement de terre dévastateur qui a frappé le Népal en 2015. **M. B.**

Le trésor caché des arènes de Nîmes

ARCHÉOLOGIE Des fouilles menées par l'Inrap en parallèle des travaux de restauration des arènes de Nîmes, bâties au début du IIe siècle, ont révélé que l'édifice en pierre de 24 000 places avait été construit par-dessus un amphithéâtre en bois, édifié, lui, un siècle auparavant. Ce bâtiment originel serait ainsi l'un des plus anciens amphithéâtres connus érigés en Gaule. Même si, jusqu'à preuve du contraire, celui de Lyon, construit en l'an 19, lui reste antérieur. **H. J.**

IL A DIT

« Nos résultats indiquent que les moustiques s'étaient déjà diversifiés au jurassique et que la morphologie de leurs larves est restée remarquablement stable depuis 100 millions d'années »

André Amaral, paléontologue à l'université de Munich (Allemagne), rapportant la découverte inédite d'une larve de moustique fossilisée dans un morceau d'ambre birman de 99 millions d'années.

Une bière psychédélique pour unifier les peuples pré-incas

ANTHROPOLOGIE Une bière aromatisée aux graines de vilca, une plante hallucinogène, était consommée lors de banquets organisés par les Huari, une civilisation pré-inca des Andes centrales entre 600 et 1000 de notre ère. Selon l'étude, l'expérience psychédélique offerte par ce breuvage devait permettre de maintenir et renforcer des liens politiques et sociaux entre différentes tribus éloignées. **H. J.**

SOURCE : JUSTIN JENNINGS, MUSÉE ROYAL DE L'ONTARIO, CANADA.

AKG IMAGES

Bouteille huari en forme de félin (VIIe-Xe siècle de notre ère).

COMITÉ SCIENTIFIQUE PRO ANIMA

RÉPONDRE AUX ENJEUX DE SANTÉ DU 21E SIÈCLE

AVEC DE NOUVELLES APPROCHES NON ANIMALES POUR UNE RECHERCHE BIOMÉDICALE PLUS INNOVANTE, ÉTHIQUE ET FIABLE ET DES SUBSTANCES CHIMIQUES MIEUX TESTÉES

VOS DONS FONT NOS ACTIONS

SOUTENIR LE COMITÉ PRO ANIMA

C'EST SOUTENIR LA RECHERCHE ET LES PROGRÈS SCIENTIFIQUES D'AUJOURD'HUI ET DE DEMAIN

4 PRINCIPALES MISSIONS

- ✓ **Valoriser et accélérer l'implémentation des nouvelles approches non animales** (NAM) centrées sur les données humaines (modèles 3D complexes *in vitro*, intelligence artificielle, jumeaux numériques…)
- ✓ **Faire dialoguer, former, accompagner les acteurs clés** (industrie, recherche publique, institutions et agences réglementaires)
- ✓ **Sensibiliser et informer la société civile** aux enjeux de santé publique, d'innovation, de compétitivité et de souveraineté
- ✓ **Financer des recherches de 1er plan** *via* le Prix Descroix-Vernier EthicScience, l'unique prix français exclusivement dédié aux méthodes non animales

Le Comité scientifique Pro Anima est une structure pionnière en France créée en 1989 par Christiane Laupie-Koechlin sous la présidence d'honneur du Prof. Théodore Monod

Société Nationale pour la Défense des Animaux SNDA

Cette campagne est généreusement soutenue par la SNDA Société Nationale pour la Défense des Animaux

www.proanima.fr
info@proanima.fr

400

Le nombre d'espèces microbiennes dans la bouche de Richard III

PALÉOGÉNÉTIQUE Le microbiote buccal du roi Richard III d'Angleterre (1452-1485) a été reconstitué grâce à l'extraction d'ADN ancien sur des échantillons de tartre dentaire. L'abondance d'une bactérie, *Tannerella forsythia*, suggère qu'il aurait pu souffrir d'une parodontite, une grave infection des gencives. **H. J.**

SOURCE : IRINA VELSKO, INSTITUT MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

UNIVERSITY OF LEICESTER/AFP

Le crâne du monarque a été authentifié en 2014.

Il y a 1300 ans, des systèmes digestifs malmenés au Mexique

ARCHÉOLOGIE
Des excréments humains vieux de 1100 à 1300 ans, découverts dans la tristement célèbre « Cueva de los muertos chiquitos » — la « Grotte des enfants morts » — au Mexique, ont révélé que les habitants de l'époque étaient déjà confrontés à de sévères infections intestinales. C'est la première fois que le parasite intestinal *Blastocystis*, connu pour provoquer des troubles gastro-intestinaux, ainsi que diverses souches de la bactérie pathogène *Escherichia coli* sont mis en évidence dans des matières fécales aussi anciennes. **M. B.**

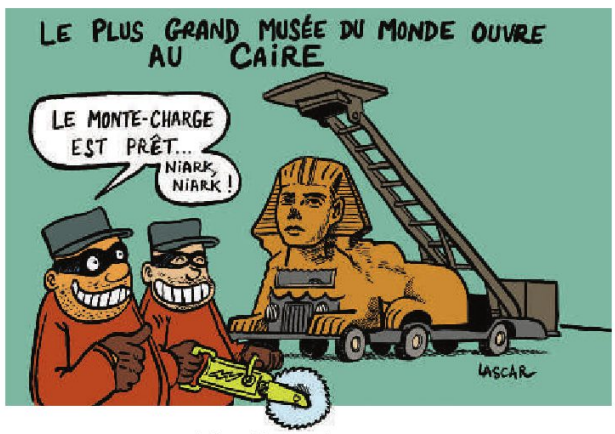
CARL LIPO

À l'aide de cordes tirées par 18 personnes, les chercheurs sont parvenus à faire bouger une réplique de 4,35 t.

Faire marcher les moais de l'île de Pâques

Ces mégalithes de plusieurs tonnes auraient été conçus pour un transport à la verticale.

La modélisation 3D de 962 des célèbres moais de l'île de Pâques ainsi que des essais sur le terrain ont fini de convaincre Carl Lipo, anthropologue à l'université de Binghamton (États-Unis) : la forme de ces statues monumentales — une large base en forme de D et une inclinaison vers l'avant — permettait de les faire se balancer latéralement grâce à des cordes, simulant ainsi la marche. Autrement dit, ces mégalithes de plusieurs tonnes auraient été conçus pour un transport à la verticale. L'étude parue dans *Journal of Archaeological Science* rapporte qu'une réplique de 4,35 tonnes a parcouru 100 mètres en 40 minutes avec seulement 18 personnes, tirant alternativement la statue de gauche à droite. Cette théorie avait déjà été formulée par Carl Lipo il y a près de quinze ans, mais était très contestée. Elle apparaît désormais plus crédible et concorde avec les traditions orales des Rapa Nui qui décrivent les moais « marchant » depuis la carrière. **H. J.**



L'œil de Lascar

30 ANS QU'IL ÉTAIT ESPÉRÉ ! Le Caire a inauguré son Grand Musée égyptien (GEM) le 1er novembre, sur un demi-million de m² ; son attraction phare est le trésor de Toutankhamon. Près de 5000 objets funéraires découverts dans ce tombeau inviolé de la Vallée des Rois y sont réunis pour la première fois. **O. L.**

Une cartographie complète des voies romaines

ARCHÉOLOGIE Une voie romaine passe-t-elle près de chez vous ? C'est ce qu'il est désormais possible d'examiner sur Itiner-e*, un outil interactif recensant les routes connues de l'Empire romain vers 150 après J.-C. Fruit d'une compilation inédite de données archéologiques, topographiques et satellitaires, cette carte porte de 188 555 à 299 171 km la longueur connue du réseau routier de cet empire. **H. J.**

* **sciav.fr/946itiner**

SOURCE : PAU DE SOTO, UNIVERSITÉ AUTONOME DE BARCELONE, ESPAGNE.

Kinedo

La **sécurité** sans compromis

mais pas à n'importe quel prix !

PRODUITS ÉLIGIBLES À

MaPrimeAdapt'

Nouveau dispositif d'aide du gouvernement français

jusqu'à **70% d'aide** pour l'adaptation de votre salle de bain (selon conditions)

AVANT >

Remplacez votre baignoire par une **douche sécurisée.**

Devis gratuit

FABRIQUÉ EN FRANCE

PLUS D'INFORMATIONS AU

0 800 05 06 07 Service & appel gratuits

ou sur www.kinedo.com

VU À LA TV

DEMANDE DE DEVIS GRATUIT

A envoyer dans une enveloppe non-affranchie à
AQUAPRODUCTION - LIBRE RÉPONSE 51045 - 44680 SAINTE PAZANNE

❑ Oui, je souhaite en savoir plus sur les solutions douche Kinedo pour remplacer ma baignoire et bénéficier d'un **DEVIS GRATUIT** sans engagement de ma part.

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal : ..... Ville : .....

Téléphone : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Email : .....

Douche sécurisée - Sciences et Avenir

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

L'IA, éloquente mais peu laborieuse

Alors que les géants du secteur multiplient les annonces et les investissements, plusieurs études montrent que l'adoption massive des outils d'IA à des fins professionnelles s'intègre difficilement aux processus de travail.

Moteurs de recherche, outils bureautiques, messageries… L'intelligence artificielle générative s'immisce partout. OpenAI a même lancé en octobre une application de réseau social destinée aux vidéos générées par son modèle Sora2. Mais qu'en est-il des usages réels ? Notamment dans les activités professionnelles avec lesquelles les fournisseurs de technologies espèrent rentabiliser leurs développements ? Coup sur coup, en septembre, OpenAI et Anthropic ont levé le voile sur la manière dont leurs modèles respectifs, ChatGPT et Claude, étaient utilisés. Associée à un économiste de l'université Harvard (États-Unis), une équipe d'OpenAI a ainsi publié un rapport analysant des échantillons d'au moins un million de messages ou conversations dans ChatGPT entre mai 2024 et juin 2025.

Le premier constat est net : 73 % des messages ne sont pas liés au travail de l'utilisateur, quand cette part n'était que de 53 % en 2024. À 77 %, les conversations concernent des tâches quotidiennes, de la recherche d'information, ou encore des renseignements pratiques (tutoriels, santé…). Dans 49 % des cas, il s'agit d'une question directe, demande d'information, de conseil. Si 40 % des messages impliquent que ChatGPT effectue une tâche (écrire le premier jet d'un texte, résumer), un tiers d'entre eux concerne le travail. OpenAI est ainsi obligé de reconnaître que la programmation informatique n'est qu'*« une activité de niche »* sur ChatGPT : 4,2 % des messages s'y rapportent, contre plus de 30 % avec Claude.

POUR EN SAVOIR PLUS

▸ Les chiffres 2025 de l'IA générative en entreprise selon le rapport du MIT : **sciav.fr/946entreprise**

De son côté, Anthropic a opté pour une approche différente. Son analyse examine trois périodes entre décembre 2024 et août 2025 et ne porte que sur des activités professionnelles. Mais les chiffres restent révélateurs : à 36 %, la programmation et les mathématiques dominent les usages, comme dans l'étude publiée en février (37 %). Ceux relatifs à l'éducation scolaire et aux bibliothèques progressent de 9 à 13 %, mais dans le secteur des affaires et de la finance, Claude décline de 6 à 3 % et dans le management, de 5 à 3 %.

Mauvaise adaptation de l'IA aux outils existants

Un des rapports les plus instructifs est peut-être celui du Massachusetts Institute of Technology (MIT, États-Unis), fondé sur des sondages et des entretiens, publié lui aussi en septembre. Il se focalise sur l'IA générative dans les entreprises américaines réalisant un chiffre d'affaires de 100 millions de dollars. Celles-ci sont 80 % à avoir lancé une phase d'étude pour un outil d'IA générique, 50 % à mener un projet pilote, mais 40 % à témoigner d'une mise en œuvre réussie, c'est-à-dire avec un retour sur investissement. Ces chiffres tombent à 60 %, 20 % et, surtout, 5 % quand l'outil est conçu pour effectuer une tâche précise. L'un des freins principaux vient de ce que la plupart des produits proposés s'intègrent mal aux processus de travail existants, y compris les IA développées en interne. Le changement de paradigme promis se fait attendre. ■

Arnaud Devillard

HANSLUCAS/AFP

L'IA Claude a été intégrée à l'application Copilot de Microsoft.

Microsoft se tourne vers Anthropic

MODÈLE Partenaire historique d'OpenAI, Microsoft avait basé son assistant intelligent Copilot sur les modèles GPT. Mais depuis septembre, dans un contexte de tensions entre les deux entreprises, il intègre les technologies du rival d'OpenAI. En pratique, les utilisateurs ont le choix entre GPT (OpenAI) et Claude (Anthropic), que ce soit pour des applications d'entreprise ou pour la suite bureautique Office. **A. D.**

IL A DIT

« Déléguer à une IA n'est pas moralement neutre : nous montrons que les machines obéissent plus souvent que les humains aux instructions malhonnêtes »

Jean-François Bonnefon, directeur de recherche CNRS en psychologie cognitive, s'exprimant sur le site The Conversation à propos d'une étude parue en septembre dans *Nature*.

SHUTTERSTOCK

OpenAI et Mistral ont introduit une fonction mémoire dans leur « chat ».

Des chatbots à mémoire

FONCTIONNALITÉ ChatGPT, d'OpenAI, et Le Chat, de Mistral, ont été dotés, début septembre, d'une fonction similaire permettant de classer des discussions différentes, et les documents envoyés qui vont avec, par thèmes, dans des dossiers. Cela permet d'opérer des recherches et d'appliquer des règles dans un fil d'échanges sans que cela n'affecte les autres. **A. D.**

BRUNO LÉVY

LA CHRONIQUE DE
JEAN-GABRIEL GANASCIA*

La croisade contre les incroyants de l'IA

L'Antéchrist, tel est le titre que Peter Thiel a donné à la série de quatre conférences d'environ deux heures chacune qu'il a tenues à San Francisco (États-Unis) en septembre dernier, devant un auditoire confidentiel, pour dénoncer les partisans d'une limitation de l'Intelligence artificielle. En référence au film de Stanley Kubrick où un général américain, Jack Ripper, engage des bombardiers B-52 dans une guerre nucléaire fatale pour l'humanité, il les accuse d'être des *Dr Folamour* responsables d'une catastrophe planétaire potentielle parce qu'ils menaceraient l'avenir des États-Unis d'Amérique et ouvriraient la voie à un totalitarisme global en voulant priver l'humanité des sciences et des technologies. Ainsi en irait-il de Greta Thunberg, mobilisée contre l'IA à cause de ses effets sur l'environnement, ou de Eliezer Yudkowsky, un éminent critique des industries du numérique. Que l'on s'accorde ou non avec les positions extrêmes et parfois assez immatures de ces pourfendeurs de l'IA, les outrances de Peter Thiel déconcertent. Cofondateur avec Elon Musk de PayPal, investisseur précoce de Facebook et fondateur de Palantir, une société spécialisée dans la surveillance de masse, ce multimilliardaire d'origine allemande défendit un temps des thèses libertariennes, opposées à toute intervention de l'État, avant d'adopter une forme singulière de nationalisme chrétien. Comment ne pas voir là, dans cet appel à une croisade contre les incroyants de l'IA, à ceux qu'il qualifie pour les discréditer de *« légionnaires de l'Antéchrist »* et qu'il présente comme des démons maléfiques œuvrant contre les États-Unis, Dieu et le bien, une aspiration bien inquiétante à la rédemption de l'humanité par les technologies ! ■

* **Professeur à Sorbonne Université,** à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Les géniales erreurs d'Albert Einstein

Alors que prend fin une « année Einstein » riche en anniversaires (70 ans de sa mort en 1955 ; 120 ans de la relativité restreinte ; 110 ans de la relativité générale), retour sur l'incroyable destin du génie de la physique. Un esprit anticonformiste dont les erreurs ont presque toujours été fécondes, car elles ont ouvert la voie aux grandes avancées d'aujourd'hui.

Dossier réalisé par
Franck Daninos, Ivan Kiriow
et Fabrice Nicot

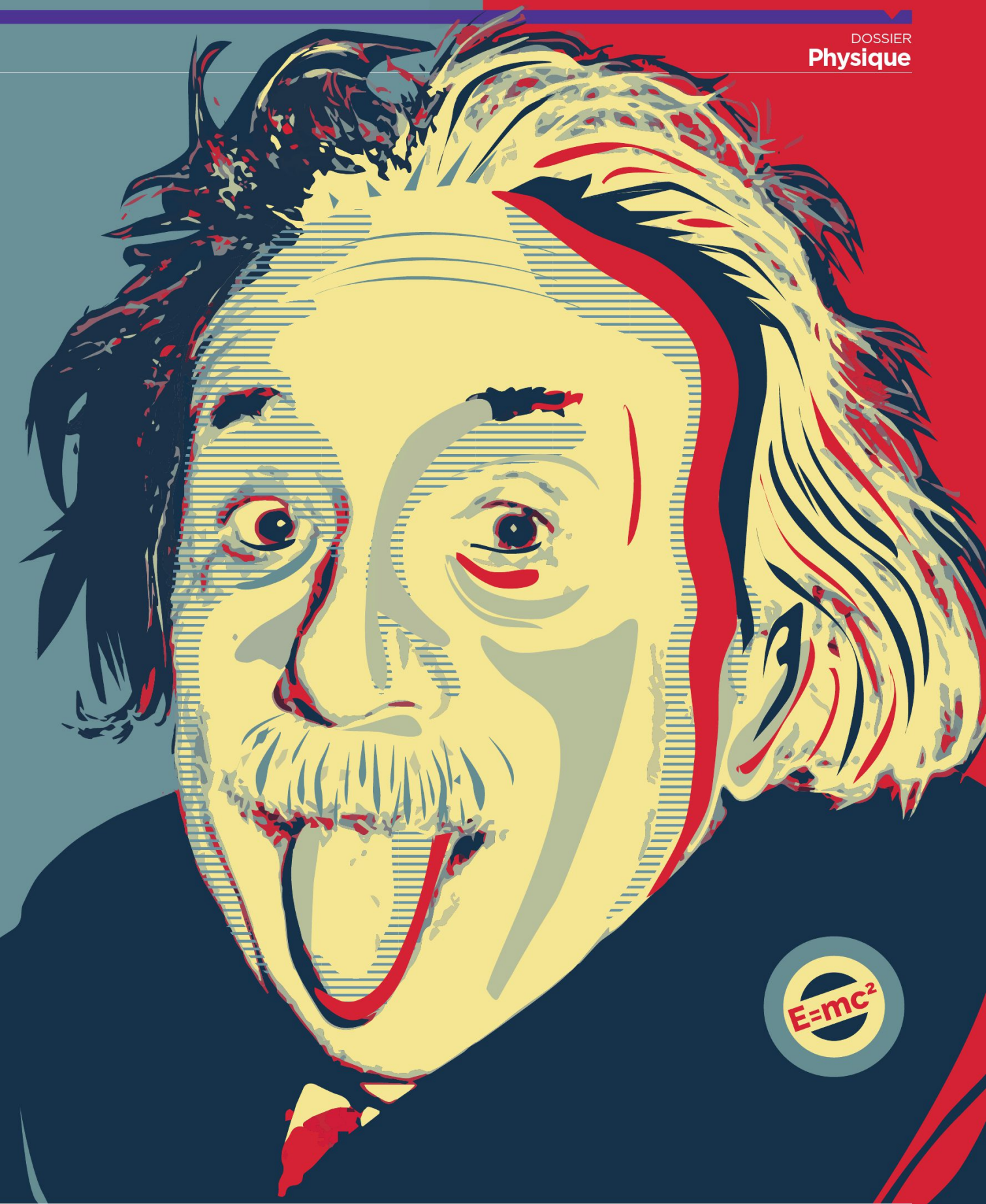
PORTRAIT
Quand le doute mène au génie
p. 30

DÉCOUVERTES
Ces erreurs qui ont fait la cosmologie
p. 34

CONTROVERSE
Les relations houleuses avec la mécanique quantique
p. 37

ENTRETIEN
Jean-Pierre Luminet, astrophysicien
p. 39

ILLUSTRATION MEHDI BENYEZZAR (SOURCE ROGER VIOLLET)


E=mc²

Quand le doute mène au génie

Le plus célèbre physicien de l'histoire n'a jamais hésité à s'aventurer dans l'inconnu et à courir le risque de se tromper. Ces erreurs n'occultent en rien le génie de ses découvertes, le pouvoir prédictif impressionnant de ses théories, mais dressent un portrait plus riche du savant échevelé.

« *Quiconque n'a jamais commis d'erreur n'a jamais rien tenté de nouveau.* » Cette phrase figure parmi les nombreuses citations attribuées à Albert Einstein qui s'étalent dans les mèmes des réseaux sociaux aussi bien que sur les tee-shirts, mugs… Mais on ne mesure pas toujours combien cette maxime apocryphe (on ne la trouve nulle part dans ses écrits, ni citée par une source fiable) s'applique au plus célèbre physicien de l'histoire ! On peut même gager qu'il aurait approuvé cette autre citation (authentique celle-là), signée d'un génie de la même stature, le Français Alexandre Grothendieck, que l'on a même surnommé « l'Einstein des mathématiques » : « *Craindre l'erreur et craindre la vérité est une seule et même chose. Celui qui craint de se tromper est impuissant à découvrir. C'est quand nous craignons de nous tromper que l'erreur qui est en nous se fait immuable comme un roc.* »

Alors que prend fin une « année Einstein » riche en anniversaires (70 ans de sa

Albert Einstein naît en 1879 à Ulm, en Allemagne. Installé aux États-Unis à partir de 1933, il y décédera en 1955 à la suite d'une rupture d'anévrisme.

mort en 1955 ; 120 ans de « l'année miraculeuse » 1905 et de ses quatre articles révolutionnaires ; 110 ans, enfin, de la relativité générale), le génie excentrique n'a rien perdu de son aura légendaire. Rappelons que durant la seule année 1905, il avait remis en question l'immuabilité de l'espace et du temps avec sa théorie de la relativité restreinte, démontré l'existence des atomes par le mouvement brownien (mouvements imprévisibles de petites particules elles-mêmes entraînées par l'agitation des molécules invisibles), donné un coup d'envoi décisif à la physique quantique en expliquant l'effet photoélectrique (propriété de certains métaux d'émettre un courant électrique sous l'effet de la lumière) et établi l'équivalence entre énergie et matière (la fameuse équation $E = mc^2$). Puis, après avoir connu de son vivant une des plus éclatantes confirmations jamais apportées à une théorie scientifique (la relativité générale) lors de l'éclipse de 1919, avec la mesure de la déviation au voisinage du Soleil de rayons lumineux en provenance d'étoiles lointaines, il avait acquis un rang de quasi-prophète de la physique par les nombreuses confirmations posthumes de ses brillantes intuitions. Laser, lentilles et ondes gravitationnelles ou autres trous noirs — on semble n'avoir jamais fini de s'écrier : *« Le vieil Albert avait raison ! »*

Son esprit anticonformiste empruntait volontiers des chemins de traverse pour résoudre les énigmes théoriques qui le hantaient

L'importance de l'erreur et surtout de l'errance

Pourtant, son parcours illustre bien à quel point il est aussi important de savoir se tromper, ou au moins d'en courir le risque, si l'on veut avancer dans la quête de vérité qui a été la grande passion de sa vie. Car dans son cheminement scientifique (nous laisserons de côté sa vie privée, qui a elle aussi ses zones d'ombre), les erreurs et autres errements n'ont pas manqué. Souvent dans le mouvement même où il énonçait l'une de ses idées visionnaires, parfois en marge ou en contrepoint de ces grandes réussites. Chacune nous en apprend un peu plus sur cette icône incontestée de la science — et peut même paradoxalement ajouter à son aura en la teintant de cette touche d'humanité qui lui sied si bien.

Lorsqu'il prit son poste en 1933 à l'Institut d'études avancées de Princeton (États-Unis), où il devait rester jusqu'à la fin de sa vie, on demanda à Einstein de quel équipement il avait besoin. Selon son biographe Denis Brian, il aurait répondu : *« Un bureau ou une table, une chaise, du*

LEO BAECK INSTITUTE

Les dates marquantes

1900
Après des études à l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse), il obtient son diplôme d'enseignement en physique et mathématiques.

1905
Lors de cette « année miraculeuse », il publie quatre articles majeurs sur l'effet photoélectrique, le mouvement brownien, la relativité restreinte et la relation « $E = mc^2$ ».

1915
En poste à l'université de Berlin (Allemagne), il présente les équations de champ de la relativité générale après des années de travail.

1919
La confirmation expérimentale de la relativité générale, lors d'une éclipse solaire, fait la une des journaux. Einstein devient une célébrité mondiale.

1921
Il obtient le prix Nobel de physique pour ses contributions à la physique théorique et, spécialement, pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique.

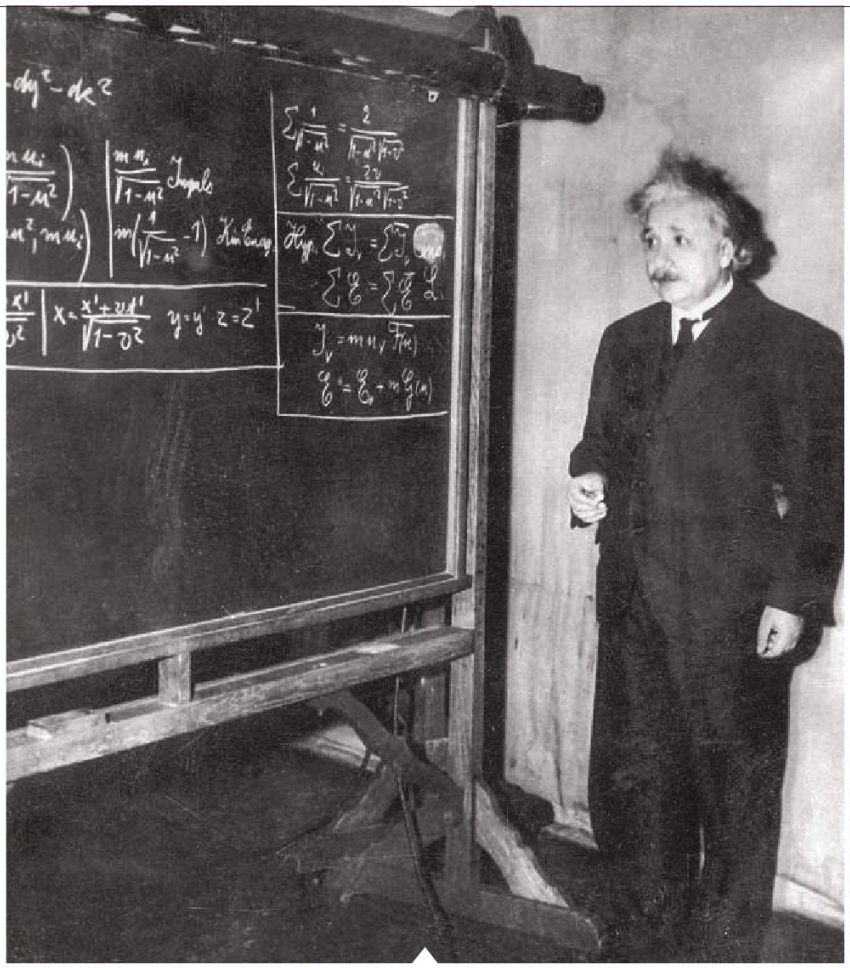
1933
Face à la montée du nazisme il fuit l'Allemagne pour s'installer aux États-Unis, à l'Institut d'études avancées de Princeton.

papier et des crayons, et aussi une grande corbeille à papier pour que je puisse y jeter toutes mes erreurs. » Son esprit anticonformiste empruntait en effet volontiers des chemins de traverse pour résoudre les énigmes théoriques qui le hantaient. En particulier, pendant les dix ans qui séparèrent le triomphe de la relativité restreinte en 1905 et la découverte des équations de champ de la relativité générale fin 1915. Ce cheminement tortueux illustre bien l'importance de l'erreur dans toute grande découverte. Ou plutôt de l'errance, cette faculté d'explorer les pistes les plus aventureuses, de tester les idées parfois les plus « folles ».

Ses successeurs lui ont souvent donné raison contre lui-même

Et Einstein ne craignait pas de s'aventurer ainsi dans l'inconnu, quitte à penser contre lui-même, à remettre en question ce que ses propres théories avaient établi comme un dogme intouchable. Comme il l'écrivait en 1945 à un de ses correspondants, *« une personne scientifique ne comprendra jamais pourquoi elle doit croire à des opinions simplement parce qu'elles sont écrites dans un certain livre. En outre elle ne croira jamais que les résultats de ses propres tentatives sont définitifs.* »

Prenons l'exemple d'un de ses apports théoriques majeurs, établi par la théorie de la relativité restreinte : la vitesse de la lumière (dans le vide) est une constante universelle, notée *c* . Rien ne peut l'altérer, ni les mouvements de sa source, ni sa longueur d'onde, ni les contorsions que lui imprime l'espace-temps. Pourtant dès 1911, un savant iconoclaste avait déjà imaginé la possibilité d'une vitesse de la lumière variable. Et ce frondeur n'était autre qu'un certain… Albert Einstein ! Alors qu'il cherchait désespérément à faire entrer la gravitation dans le cadre de sa relativité (qui était alors restreinte aux mouvements linéaires uniformes, soumis à aucune force ni accélération), il envisagea en effet que la lumière puisse être accélérée par la matière-énergie (dont il avait démontré l'équivalence en 1905 dans la célébrissime formule $E = mc^2$).



KEYSTONE-FRANCE/GAMMA RAPHO

Le 28 décembre 1934, Albert Einstein donne une conférence à l'Institut de technologie Carnegie, à Pittsburg (États-Unis), au cours de laquelle il expose sa formule « $E = mc^2$ ».

Face à ce travail exploratoire, son collaborateur et biographe Banesh Hoffmann avait reculé d'horreur, y voyant une *« hérésie »* ! Et même si cette tentative a très vite été reléguée dans le secret de ses tiroirs et les oubliettes de l'histoire, l'idée a resurgi chez d'autres chercheurs aventureux, avides de spéculations audacieuses (*lire l'encadré ci-contre*).

Ce ne fut pourtant pas le plus souvent par excès d'audace que pêcha le grand scientifique. C'est au contraire une prudence excessive et un manque de confiance dans la validité de ses propres doctrines qui le firent passer à côté de plusieurs découvertes majeures, en reculant devant les incroyables conséquences de ses théories. Mais ici ses successeurs lui ont souvent donné raison… contre lui-même, comme dans le cas des trous noirs — dont l'existence, qui avait pourtant été déduite

Une prudence excessive et un manque de confiance dans la validité de ses propres doctrines le firent passer à côté de découvertes majeures, en reculant devant les incroyables conséquences de ses théories

de ses équations, lui paraissait inconcevable — ou des ondes gravitationnelles, ces oscillations qui font onduler la trame même de l'espace-temps, provoquées par d'énormes cataclysmes cosmiques (comme justement la collision de deux trous noirs), mais si infimes qu'il a fallu des trésors d'ingéniosité et un appareillage ultrasophistiqué, l'interféromètre Ligo, pour les détecter pour la première fois en 2015 (*lire p. 34*).

Un attachement farouche au déterminisme causal

Alors qu'il mûrissait la relativité générale, Einstein commit une autre erreur qui aurait pu avoir des répercussions désastreuses sur son destin de génie. Il est toujours hasardeux de spéculer sur les uchronies, ces scénarios où l'histoire dévie de son cours, mais imaginez un peu : si un temps trop nuageux n'avait pas empêché une première observation, celle de l'éclipse solaire au Brésil en 1912 ; et si la Première Guerre mondiale n'avait pas contrarié les projets d'une seconde expédition en Crimée en 1914 et retardé la mise à l'épreuve de la relativité, les prédictions d'Einstein seraient passées complètement à côté ! Les premiers calculs qu'il avait effectués en 1911 de la déviation de rayons lumineux au voisinage du Soleil avaient en effet sous-estimé de moitié cet effet de la courbure de l'espace-temps par la matière-énergie, sorte de « mirage gravitationnel » (on parle aussi d'un effet de « lentille gravitationnelle », car les étoiles observées autour du Soleil semblent plus éloignées les unes des autres que lorsque leur lumière n'est pas déviée). Contraint d'attendre que l'armistice de 1918 ait laissé de nouveau la voie libre aux expéditions internationales, le physicien eut le temps de rectifier à la hausse sa prédiction, qui se trouva confirmée avec éclat en 1919 par l'expédition d'Arthur Eddington au large des côtes du Gabon. Il avait en effet eu dans l'intervalle tout le temps d'affiner ses calculs. L'art de se tromper consiste parfois à se tromper assez tôt… et à faire confiance aux aléas de l'existence ! On peut aussi se demander si le refus d'Einstein d'accepter l'évolution de la mécanique quantique (qui régit le comportement des particules et à laquelle le savant a largement contribué) vers une théorie probabiliste et son attachement farouche au déterminisme causal peuvent être comptés parmi ses « erreurs », ou si cet entêtement était au contraire une marque de lucidité et de probité. Car si l'avenir a opposé à Einstein un cinglant démenti expérimental dans le cas du « paradoxe EPR » (*lire p. 37*), la compréhension profonde de la physique quantique reste un défi pour l'entendement humain.

Que l'avenir lui ait donné tort ou raison malgré lui, ces erreurs n'occultent en rien la gloire de ses succès, le génie de ses découvertes, le pouvoir prédictif impressionnant de ses théories, mais dressent un portrait plus riche du savant échevelé. Certaines ont ouvert des pistes prometteuses, d'autres renaissent de leurs cendres sous une forme parfois inattendue, mais une chose est sûre : les erreurs d'Einstein ont encore de beaux jours devant elles ! ■ **I. K.**

POUR EN SAVOIR PLUS

▸ **Le Mystère Albert Einstein,** Ivan Kiriow, Larousse, 2024.

COSMOLOGIE

Une constante qui ne l'est peut-être pas

Après avoir brièvement envisagé la possibilité théorique d'une vitesse variable de la lumière, Einstein a rapidement abandonné cette piste. Mais son idée ne tomba pas totalement dans l'oubli : reprise en 1957 sous une forme plus élaborée par l'Américain Robert Dicke, cette hypothèse baptisée VVL (pour « vitesse variable de la lumière ») a été envisagée par la suite par plusieurs cosmologistes. Elle permettait en effet d'expliquer le « problème de l'horizon » : pourquoi des régions du cosmos qui auraient dû être isolées les unes des autres après le Big Bang présentent-elles une parfaite uniformité thermique ? Selon le modèle d'une expansion « simple », celle-ci aurait en effet été trop rapide pour rendre compte d'une telle homogénéité. Contre la théorie qui fut alors privilégiée, celle de l'inflation, qui postulait sans l'expliquer une expansion d'abord plus lente, puis ultrarapide, des chercheurs ont alors imaginé que la lumière se déplaçait plus vite dans la prime jeunesse de l'Univers, permettant ainsi les échanges thermiques (dont la vitesse limite est celle de la lumière). Le Portugais João Magueijo, qui a défendu cette théorie et l'a vulgarisée en 2003 dans son livre *Plus vite que la lumière*, proposait encore en 2016 de la soumettre au verdict des images du fond diffus cosmologique obtenues par le satellite Planck. Cette théorie VVL reste certes marginale et n'a encore été validée par aucune observation, mais elle offre un bel exemple de l'audace sans laquelle la science ne peut avancer. **I. K.**

Ces erreurs qui ont fait la cosmologie

De la constante cosmologique aux ondes gravitationnelles, Einstein a souvent contesté ses propres découvertes avant qu'elles ne triomphent. Ses « erreurs » — parfois de calcul, parfois de jugement — auront pourtant fécondé toute la cosmologie moderne.

Si l'art de douter est une qualité majeure chez un scientifique, Einstein l'a pratiqué avec une ardeur singulière. À lui seul, il est à l'origine d'une grande partie des découvertes majeures qui animent encore aujourd'hui la cosmologie, soixante-dix ans après sa mort : la constante cosmologique et l'expansion de l'Univers, les trous noirs, les ondes gravitationnelles… Autant de phénomènes qu'il a tour à tour prédits, contestés, puis parfois reniés. Pour Olivier Minazzoli, astrophysicien à l'université Côte d'Azur et spécialiste de la relativité générale — qu'il cherche à prolonger avec une théorie de la « relativité intriquée » —, cette ambivalence est la marque même du génie exploratoire d'Einstein : *« Pour révolutionner un champ disciplinaire, il faut oser des choses folles, et c'est précisément ce qu'il a fait. Une fois sa théorie de la relativité générale achevée, il en a exploré toutes les limites, cherchant sans cesse jusqu'où elle pouvait tenir. Cela explique à la fois ses découvertes et ses "erreurs".* »

Des erreurs presque toujours fécondes, car elles ouvriront la voie aux grandes avancées d'aujourd'hui. Si Einstein doutait de l'existence des trous noirs ou des ondes gravitationnelles, c'est surtout qu'il ne disposait pas des connaissances dont nous bénéficions désormais. Il ignorait encore l'existence des galaxies, des naines blanches et de tout le bestiaire d'étoiles compactes capables de produire ces phénomènes extrêmes. Il était, en somme, si en avance sur son temps qu'il n'a peut-être eu qu'un tort : ne pas en avoir pleinement conscience.

LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE

La constante cosmologique est un des concepts les plus fascinants de la cosmologie, et pour cause. Sa biographie est éloquente : elle est introduite par Einstein sur un malentendu, effacée et reniée par son créateur ; elle revient en force à l'orée des années 2000, soupçonnée d'être à la manœuvre dans l'accélération de l'expansion de l'Univers sous la forme d'une mystérieuse énergie noire… Elle apparaît pour la première fois dans un article de 1917 publié dans *Annalen der Physik*. Il est souvent dit qu'Einstein l'a introduite dans les équations de la relativité générale afin qu'elles décrivent un univers statique. Ainsi, elle s'opposerait en quelque sorte à la gravitation qui menacerait de faire s'effondrer l'Univers sous sa propre masse. Pour Olivier Minazzoli, ce n'est pas si simple. *« Si l'on relit l'article de 1917, on s'aperçoit que la motivation d'Einstein est différente. Ce qui le gêne, ce n'est pas tant que l'Univers soit statique, mais qu'il soit vide.* »

En effet, Einstein était influencé par les travaux du philosophe et physicien autrichien Ernst Mach (1838-1916), ce qui le conduisit à énoncer ce qu'il nomma le « principe de Mach ». Celui-ci postule que la vitesse (plus exactement l'inertie) d'un corps dépend de la présence et de la répartition de la matière dans l'Univers. Autrement dit, dans un cosmos vide, il serait impossible de dire si un corps bouge ou non : le mouvement et l'inertie ne peuvent se définir que par rapport aux autres masses. *« Or, les équations de la relativité générale sans constante admettent des solutions du vide, ce qui contredit le principe de Mach* », explique Olivier Minazzoli. Par ailleurs, un autre problème préoccupait Einstein : les limites de l'Univers. Il imaginait un univers fini mais sans bord, à l'image de la surface d'une sphère si l'on raisonne à deux dimensions d'espace seulement, pour éviter toute frontière où la matière cesserait brusquement d'exister.

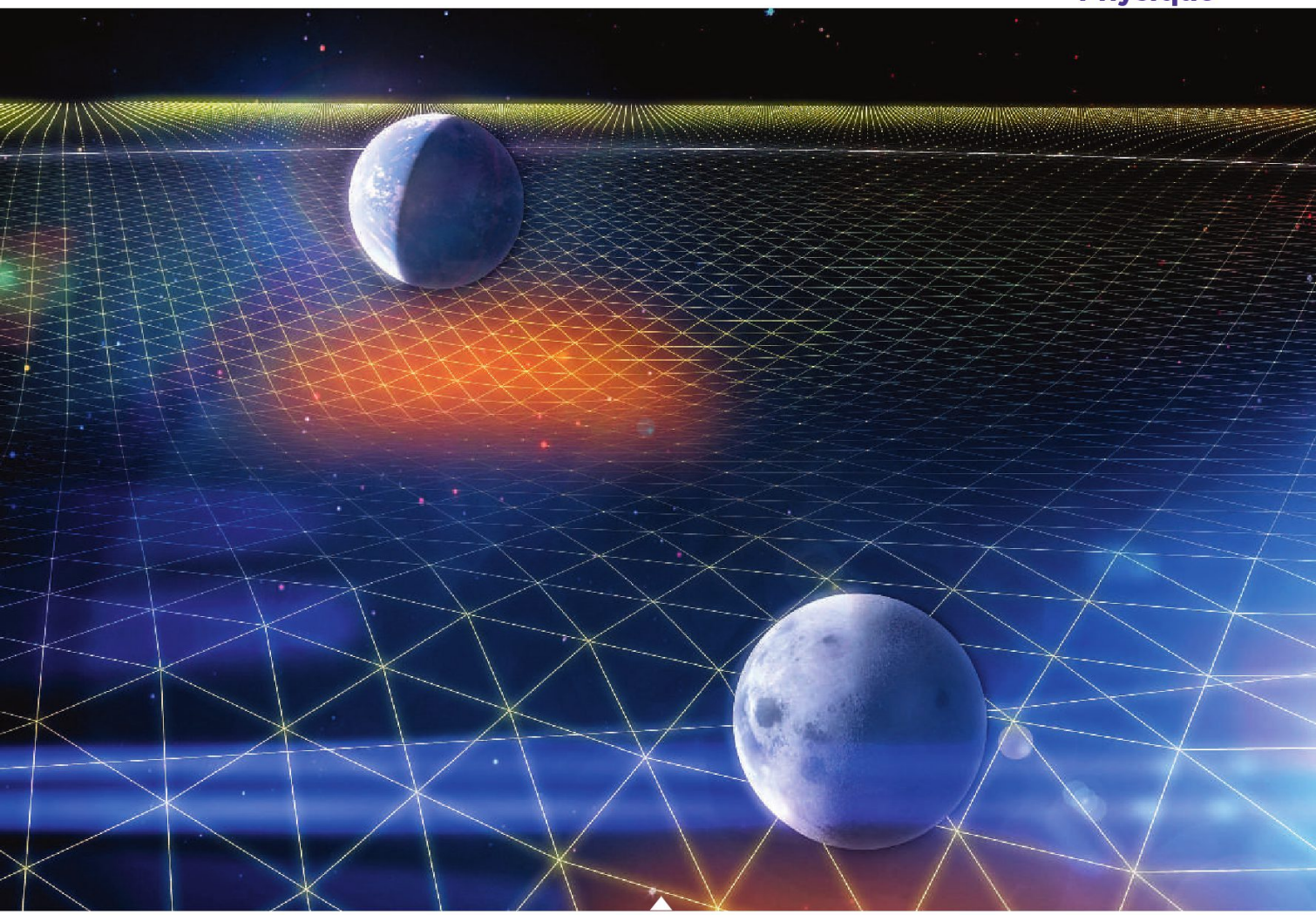


Illustration des champs gravitationnels de la Terre et de la Lune déformant le tissu de l'espace-temps. Au début, Einstein passe à côté de la notion d'espace-temps, introduite par son ancien professeur de mathématiques Hermann Minkowski.

RAMON ANDRADE/3DCIENCIA/SPL/SUCRE SALÉ

Pour éviter le vide et l'infini, il ajouta à ses équations un nouveau terme — la constante cosmologique —, dont l'effet est aussi d'induire une répulsion à grande échelle, contrebalançant l'attraction gravitationnelle et permettant ainsi à l'Univers de rester statique et fermé sur lui-même. *« La staticité de l'Univers est rendue possible par la constante cosmologique, mais ce n'était pas son objectif premier. Il voulait surtout obtenir un univers fini, sans bord, où le vide de matière n'existe pas.* » Quoi qu'il en soit, la belle construction d'Einstein s'effondre rapidement. Peu après la publication de son article, le physicien néerlandais Willem de Sitter découvre une solution des équations d'Einstein dans le vide, c'est-à-dire sans aucune matière, et pourtant compatible avec la constante cosmologique. Dès lors, elle ne résout plus le problème qu'elle devait corriger. Einstein finit par l'abandonner, d'autant plus que l'expansion de l'Univers, mise en évidence par Edwin Hubble en 1929, rendait caduque l'idée d'un cosmos figé.

L'histoire aurait pu s'arrêter là. Pourtant, la constante cosmologique fait son retour inattendu dans les années 1990, quand deux équipes d'astronomes découvrent que l'expansion de l'Univers s'accélère. Le terme abandonné d'Einstein redevient alors central : il fournit une explication naturelle à cette accélération, sous la forme d'une énergie du vide ou énergie noire. *« C'est l'un des exemples les plus frappants d'une "erreur" devenue féconde* », souligne Olivier Minazzoli. Mais rien n'est jamais définitif : les résultats récents de la mission Desi, qui cartographie l'Univers sur des milliards d'années afin de mesurer l'action de l'énergie noire, laissent entrevoir qu'elle pourrait ne pas être constante dans le temps. Plus d'un siècle après son introduction, l'aventure de la constante cosmologique continue…

L'ESPACE-TEMPS

Einstein est intimement lié à la notion d'espace-temps pris comme un tout, où il n'existe plus de distinction entre l'es-

LAURENT CARRE/LEEXTRA/OPALE

« Pour révolutionner un champ disciplinaire, il faut oser des choses folles, et c'est précisément ce qu'il a fait »

Olivier Minazzoli, astrophysicien à l'université Côte d'Azur

pace et le temps. Pourtant, il est d'abord complètement passé à côté… En 1905, lorsqu'il publie sa théorie de la relativité restreinte, il n'en parle pas du tout, comme le remarque Éric Gourgoulhon physicien à l'observatoire de Paris et spécialiste de la relativité. *« Il raisonne encore avec trois dimensions d'espace et une de temps, traitées séparément, même s'il abolit déjà la notion de temps absolu héritée d'Isaac Newton* [comme si une seule horloge universelle rythmait le temps dans tout l'Univers]. »

L'idée d'unifier l'espace et le temps viendra de son ancien professeur de mathématiques à l'École polytechnique de Zurich (Suisse), Hermann Minkowski. En 1908, il montre que la relativité restreinte se comprend mieux si l'on considère un continuum à quatre dimensions, où espace et temps se fondent dans une même trame géométrique. *« La notion d'espace-temps est vraiment née à ce moment-là,* insiste Éric Gourgoulhon. *Einstein s'est montré réticent au départ, y voyant un simple formalisme mathématique, avant de l'adopter lorsqu'il a compris qu'il en avait besoin pour construire la relativité générale.* » En effet, sans espace-temps, pas de relativité générale… Car la théorie décrit la gravitation comme une déformation de cet espace-temps par la masse et l'énergie.

Si Einstein n'a pas commis d'« erreur » en établissant la relativité restreinte, il est tout de même passé à côté d'une idée qui deviendra emblématique de son œuvre quelques années plus tard. *« Abolir le temps unique de Newton était déjà un saut conceptuel immense. Il ne pouvait pas tout inventer à la fois »*, reconnaît en souriant Éric Gourgoulhon. Quant à Hermann Minkowski, il ne verra pas toutes les conséquences de son génial apport à Einstein : il meurt brutalement en janvier 1909, à 44 ans.

LES TROUS NOIRS

En avril 2019, l'image d'un anneau de feu entourant un disque infiniment sombre fait le tour du monde. Il s'agit de la première « photo » d'un trou noir, M87*, réalisée par la collaboration internationale Event Horizon Telescope. Cette vision directe de l'astre mythique aurait sans aucun doute stupéfait Einstein : il n'a jamais cru à son existence.

Les trous noirs sont pourtant une conséquence directe de ses travaux : ils apparaissent naturellement dans les solutions possibles des équations de la relativité générale, publiées en 1915. L'année suivante, le physicien allemand Karl Schwarzschild parvient à résoudre ces équations très complexes dans le cas particulier d'un espace-temps si courbé qu'il forme une sphère d'où rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper. C'est ce que l'on appellera par la suite « l'horizon des événements ». Mais pour Einstein, c'est une curiosité qui n'a rien à voir avec un astre réel. *« Au cœur de ces solutions, il y a une singularité où la courbure de l'espace-temps tend vers l'infini. Or, les physiciens n'aiment pas beaucoup les infinis. Pour Einstein, c'était le signe d'une théorie incomplète »*, rappelle Éric Gourgoulhon.

MARK GARLICK/SPL/SUCRE SALÉ

Les trous noirs, pourtant prédits par la relativité générale, n'existaient pas selon Einstein (illustration).

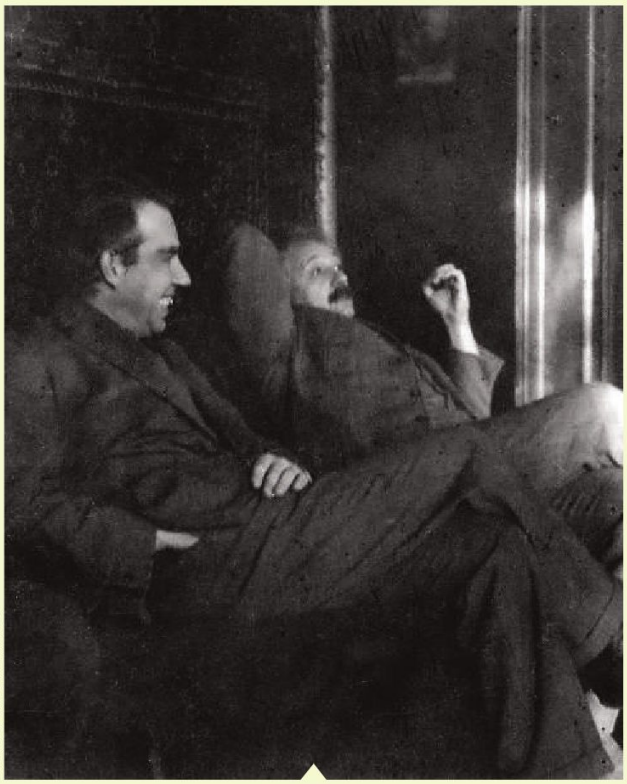
Einstein admettait donc la beauté mathématique de la solution de Karl Schwarzschild, mais pensait qu'aucun corps céleste ne pouvait atteindre une densité aussi extrême. Il s'y tient pendant près d'un quart de siècle. En 1939, il publie même un article pour tenter de le démontrer : selon lui, une étoile en effondrement gravitationnel, seul mécanisme envisagé pour former un trou noir, ne peut le devenir. D'après ses calculs, la vitesse des particules à sa surface finirait par atteindre celle de la lumière, bloquant le processus. *« Alors là, c'est vraiment une erreur de raisonnement, presque de débutant,* s'amuse Éric Gourgoulhon. *Einstein a approximé l'effondrement d'une étoile comme étant une succession d'états d'équilibre. Mais une étoile qui s'effondre n'est jamais en équilibre, c'est un régime dynamique.* »

Ironie du calendrier : la même année, les physiciens américains Robert Oppenheimer et Hartland Snyder font la démonstration inverse. Ils montrent qu'une étoile suffisamment massive peut s'effondrer sous son propre poids, après avoir épuisé son carburant, jusqu'à former une région d'où la lumière ne peut plus s'échapper. C'est la première description complète de la formation d'un trou noir, confirmant que la relativité générale prédit de tels objets. Mais ce résultat passe inaperçu. Le monde est au bord de la guerre, et Robert Oppenheimer sera bientôt occupé par le projet Manhattan et la bombe atomique.

ÉPISTÉMOLOGIE

Les relations houleuses d'Einstein avec la mécanique quantique

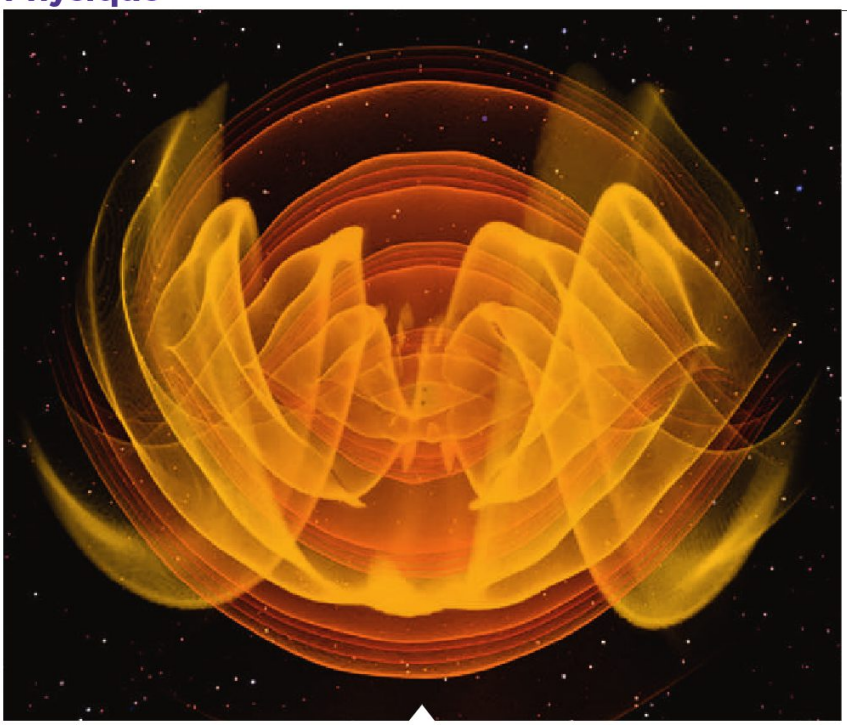
On l'oublie souvent, mais Einstein a été un pionnier de la physique quantique avec son article de 1905 sur l'effet photoélectrique. Il s'était alors saisi de l'idée des « quanta », ces « paquets » d'énergie que le physicien allemand Max Planck avait sortis de sa manche en 1900 dans un dernier effort désespéré pour venir à bout des incohérences du « rayonnement du corps noir » (un modèle théorique où la matière absorbe toute la lumière et en émet sous l'effet de la chaleur). Ce qui n'était pour Planck qu'une astuce mathématique était devenu chez Einstein une interprétation physique, mettant en évidence la double nature (onde et particule) de la lumière, dualité étendue en 1923 par le Français Louis de Broglie aux électrons, puis à l'ensemble de la matière. Mais Einstein avait par la suite entretenu des relations houleuses avec sa « créature » : il ne se reconnaissait plus dans ce qu'on a appelé l'interprétation de Copenhague, synthèse des apports théoriques de physiciens gravitant autour de la figure du Danois Niels Bohr. Il faut dire qu'elle chamboulait toute notre vision du monde : une particule pouvait exister à la fois dans deux états ou à deux endroits distincts ; l'observateur influait sur les phénomènes qu'il mesurait ; et surtout, on ne pouvait prédire les effets d'une cause donnée qu'en termes de probabilités. C'en était trop pour Einstein, dont l'histoire a retenu la célèbre sentence *« Dieu ne joue pas aux dés »*, d'abord lancée dans une lettre à son ami Max Born — à l'origine justement du tournant probabiliste pris par la théorie —, puis reprise dans ses débats avec Bohr. En 1935, il avait signé avec deux jeunes collègues, le Russe Boris Podolsky et l'Américain Nathan Rosen, un article destiné à démontrer par l'absurde les insuffisances de la théorie quantique. Celle-ci aurait en effet conduit à un paradoxe baptisé EPR (les initiales des trois coauteurs) : deux particules distantes pouvaient exister dans un état « intriqué », liées par ce qu'Einstein a appelé *« une action fantôme à distance »*, qui impliquait un échange instantané d'information (on pouvait connaître l'état d'une particule en mesurant celui de l'autre). Impossible, pour le père de la relativité ! Or en 1964, l'Irlandais John Bell imagina un test expérimental à même de trancher la question. Et en 1982, le Français Alain Aspect le mit en application, démontrant la réalité de ce stupéfiant phénomène de l'intrication quantique — ce qui lui valut de remporter en 2022 le prix Nobel de physique avec l'Américain John Clauser et l'Autrichien Anton Zeilinger. **I. K.**



SSPL/UIG/BRIDGEMAN IMAGES

Niels Bohr et Albert Einstein (ici vers 1920) ont débattu durant plusieurs années sur leur conception divergente de la mécanique quantique.

Une particule pouvait exister à la fois dans deux états ou à deux endroits distincts… C'en était trop pour Einstein



S. OSSOKINE, A. BUONANNO (MAX PLANCK INSTITUTE), W. BENGER (AIRBORNE HYDRO MAPPING GMBH)

Les ondes gravitationnelles, ici représentées lors de la fusion de deux trous noirs, ont été observées pour la première fois en 2015. Einstein pensait qu'on ne pourrait jamais les voir.

Par ailleurs, la relativité générale était un peu passée de mode. *« Dans les années 1945-1950, elle est très peu enseignée à l'université,* se désole Olivier Minazzoli. *Il n'y en avait pratiquement que pour la physique des particules. Il faudra attendre le début des années 1950, avec notamment les travaux d'Yvonne Choquet-Bruhat (1923-2025), pour démontrer que les équations de la relativité générale pouvaient être résolues de manière cohérente mathématiquement.* »

Dans les années 1960, Roger Penrose et Stephen Hawking démontrent que les singularités ne sont pas des artefacts mathématiques, mais une conséquence inévitable de la relativité générale. Peu après, les astronomes découvrent des sources de rayons X et des quasars — ces foyers de rayonnements intenses produits par la matière chauffée à l'extrême avant d'être engloutie par un trou noir —, signes indirects de ces astres invisibles qu'Einstein jugeait impossibles. Depuis une vingtaine d'années, les observations révèlent que la plupart des galaxies, dont la nôtre, abritent en leur centre un trou noir supermassif. En 2015, les détecteurs Ligo enregistrent pour la première fois les ondes gravitationnelles issues de la fusion de deux trous noirs. Enfin, quatre ans plus tard, l'horizon du monstre de la galaxie M87 se dessine sur les écrans du monde entier. Ce que le fondateur de la relativité refusait d'admettre devient l'une des plus éclatantes confirmations de sa théorie.

ÉRIC GOURGOULHON

« Même s'il avait des a priori, Einstein reconnaissait quand les équations le contredisaient »

Éric Gourgoulhon, physicien à l'observatoire de Paris

LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Dès 1916, Einstein montre que la déformation de l'espace-temps sous l'effet d'une masse — par exemple une étoile — peut se propager sous forme d'ondes lorsque cette masse accélère. Un concept fascinant : ces ondulations de l'espace-temps ne sont rien d'autre que la gravitation en mouvement. Mais il finira par douter de leur réalité physique. Dans les années 1930, il s'interroge : ces ondes transportent-elles de l'énergie, ou ne sont-elles qu'un artefact mathématique ? *« Pendant longtemps, la question de savoir si les ondes gravitationnelles transportent de l'énergie a été un vrai problème »*, rappelle Éric Gourgoulhon.

En 1936, Einstein publie avec Nathan Rosen un article concluant que ces ondes ne peuvent pas exister. Les solutions qu'ils obtiennent présentent des singularités, ce qu'Einstein interprète comme un signe d'incohérence de sa propre théorie. L'épisode donne lieu à un épisode assez cocasse. L'article est soumis à *Physical Review*, qui le confie pour relecture à un physicien — pratique courante aujourd'hui, mais encore nouvelle pour Einstein, fraîchement arrivé d'Allemagne. Le rapport du cosmologiste Howard Percy Robertson signale une erreur : un simple changement de coordonnées fait disparaître les singularités problématiques. Vexé, et sans lire l'avis du cosmologiste, Einstein écrit une lettre furibonde à la revue, affirmant qu'il n'avait *« pas autorisé »* une telle relecture. Il ne publiera plus jamais dans *Physical Review*.

Howard Percy Robertson avait pourtant raison. Einstein s'en rendra compte et corrigera son article, le faisant paraître dans une autre revue. Il admettra finalement la possibilité théorique des ondes gravitationnelles, tout en doutant qu'elles puissent un jour être détectées : leur effet lui paraissait infinitésimal. Une méfiance compréhensible à l'époque — mais qu'un siècle plus tard, les détecteurs Ligo et Virgo feront voler en éclats. ■ **F. N.**

JEAN-PIERRE LUMINET
ASTROPHYSICIEN

« Einstein rêvait de découvrir une théorie des champs unifiée »

Au début des années 1920, le grand physicien a entrepris d'unifier les forces de la physique. Un objectif poursuivi jusqu'à sa mort en 1955. Mais aucune de ses tentatives n'a pu s'imposer, explique Jean-Pierre Luminet, qui dresse un panorama des recherches actuelles.

DENIS DALMASSO / HANS LUCAS POUR SCIENCES ET AVENIR

Si rien ne permet de dire que c'est une erreur, c'est un incontestable échec : pendant plus de trente ans et jusqu'à la fin de sa vie, Albert Einstein a tenté d'unifier, en vain, les grandes forces de l'Univers. Cet objectif est-il toujours recherché par les physiciens ?

Cette quête n'a rien perdu de sa force. Il y a d'ailleurs beaucoup plus de chercheurs, par rapport à l'époque d'Einstein, qui s'attachent à trouver actuellement une théorie unitaire — appelée parfois aussi « théorie du tout » — qui engloberait en une poignée d'équations tous les aspects de la physique. Leur approche n'est certes pas exactement la même. Lorsqu'Einstein entreprit, au début des années 1920, d'unifier les forces de la physique, on n'en connaissait que deux : l'électromagnétisme d'une part, qui regroupe tous les phénomènes électriques, magnétiques et lumineux ; et la gravitation d'autre part, qui explique la chute des corps, les marées ou les orbites des planètes, décrite depuis 1915 avec une remarquable efficacité par sa théorie de la relativité générale. Mais deux autres interactions, de très courte portée, seront découvertes et théorisées peu à peu entre les années 1930 et le début des années 1970.

◀ **Jean-Pierre Luminet** est directeur de recherche émérite au CNRS et au Laboratoire d'astrophysique de Marseille. Il a publié notamment : « Voyager dans un trou noir avec Interstellar », Dunod, 2025.

Quelles sont ces interactions ?

Il s'agit de la force nucléaire forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques, donc l'existence même de la matière, et la force nucléaire faible, qui provoque la désintégration radioactive de particules subatomiques et permet aux étoiles de briller. Or, parmi ces quatre interactions fondamentales, trois (les forces électromagnétique, forte et faible) peuvent s'expliquer par des échanges de particules — le photon par exemple — entre les composants élémentaires de la matière. Elles sont régies à l'échelle microscopique par les lois de la mécanique quantique, le tout aboutissant à un modèle standard de la physique des particules qui fonc- ▶

tionne merveilleusement bien… sans traiter toutefois l'interaction gravitationnelle. Malgré les efforts de plusieurs générations de chercheurs, une description quantique de la gravitation reste en effet hors d'atteinte tout comme un modèle unifié regroupant toutes les interactions connues. Selon qu'ils étudient des phénomènes à petite ou à grande échelle, les scientifiques appliquent ainsi soit la mécanique quantique, soit la relativité générale. Une attitude « schizophrénique », qui intrigue et mécontente la plupart des théoriciens.

Qu'est-ce qui poussait Einstein à unifier la gravitation et l'électromagnétisme ?

Cette démarche unificatrice a toujours été au cœur de ses recherches. En 1905, la relativité restreinte réussissait déjà à combiner le principe de relativité de Galilée, qui unifie les notions de repos et de mouvement rectiligne uniforme, avec l'électromagnétisme et l'invariance de la vitesse de la lumière. Une théorie qui conduira à réunir dans son sens le plus strict les concepts d'espace et de temps. Puis en 1915, avec la relativité générale, Einstein avait étendu cette cinématique aux mouvements accélérés et à la gravitation, en décrivant celle-ci non pas comme une force agissant sur un espace de fond fixe mais comme une courbure locale de l'espace-temps, dont la valeur se modifie en chaque point lorsque la matière se déplace. Il était donc logique qu'Einstein cherche, par la suite, à intégrer l'électromagnétisme à cette nouvelle trame. L'histoire de la physique avait du reste maintes fois démontré que l'unification de théories en apparence disparates constituait une forme naturelle de progression de la connaissance.

> « Les candidats ne manquent pas pour accomplir le rêve inassouvi d'Einstein ! Mais alors que cette quête visait à unifier la physique, on a le sentiment qu'elle a produit plutôt une grande dispersion de concepts et d'idées »

Qui a élaboré les premières théories unitaires ?

La première tentative est due au mathématicien allemand Hermann Weyl. Dès 1918, il avait entrepris de modifier l'espace-temps de la relativité générale afin d'incorporer l'électromagnétisme. Sa structure restait courbe, mais les longueurs pouvaient varier aussi localement selon une transformation dite de jauge. Cette opération faisait intervenir un nouvel objet mathématique, en l'occurrence un vecteur, qui selon Hermann Weyl représenterait le champ électromagnétique. L'année suivante, l'Autrichien Theodor Kaluza proposa une solution extraordinairement audacieuse. Il postula l'existence d'une dimension supplémentaire aux quatre auxquelles nous sommes habitués — trois d'espace et une de temps — permettant d'intégrer les équations de Maxwell. Les particules chargées se déplaceraient dans cette nouvelle dimension spatiale, tandis que nous, humains, ne percevrions que la projection de ces mouvements dans l'espace-temps quadridimensionnel ! En 1926, le Suédois Oskar Klein expliqua pourquoi cette cinquième dimension demeurait invisible : elle ne serait pas rectiligne mais enroulée sur elle-même pour former un cercle. À une échelle extrêmement petite de surcroît, bien plus petite qu'un atome.

Qu'en a pensé Einstein ?

Il a d'abord été intrigué et séduit par ces approches, notamment la théorie de Theodor Kaluza. Mais il se montra ensuite critique envers celle-ci, regrettant en particulier qu'elle ne prît pas en compte toutes les particules de matière.

Quelles pistes a-t-il lui-même explorées ?

Après avoir élaboré la relativité générale, Einstein voulait de plus en plus tout réduire à la géométrie. Et s'est persuadé que toutes les lois de la physique découleraient d'une seule structure géométrique fondamentale. Pour unifier la gravitation et l'électromagnétisme, il s'efforça ainsi d'extrapoler et complexifier l'espace-temps de la relativité générale en explorant une variété de constructions mathématiques. Vers la fin des années 1920, il développa une structure d'espace-temps reposant non plus sur la notion de courbure mais de torsion. Dans cette théorie dénommée « gravité téléparallèle », la torsion devenait la source géométrique de la gravitation, alors que certaines composantes du champ de torsion correspondaient au champ électromagnétique. À partir des années 1930, Einstein adopta une autre stratégie. Il modifia la métrique de la relativité générale — qui définit les distances et les angles — pour y adjoindre un éventail d'espaces symétriques et antisymétriques : les uns pour décrire la gravitation, les autres pour l'électromagnétisme.

Toutes ces tentatives ont donc échoué ?

Einstein rêvait de découvrir une théorie des champs unifiée. Connaissant sa force de caractère et son esprit véritablement abstrait, il n'est pas étonnant qu'il ait poursuivi cet objectif jusqu'au bout. Mais aucune de ses tentatives n'a pu s'imposer. Certaines n'étaient pas satisfaisantes d'un point de vue physique ou mathématique, d'autres échouaient à prédire ou expliquer des observations comme

DENIS DALMASSO/HANS LUCAS POUR SCIENCES ET AVENIR

Spécialiste des trous noirs, Jean-Pierre Luminet a été le premier chercheur à effectuer une simulation réaliste de ces objets célestes, en 1979.

la charge de l'électron. Dans ses théories unitaires, Einstein adoptait en outre une approche « classique » : il ne prenait pas directement en compte la mécanique quantique qui enregistrait pourtant une somme toujours plus grande de succès. Enfin, alors que les forces nucléaires forte et faible commençaient à être mises en évidence dans les années 1930, il n'a jamais voulu les intégrer dans ses modèles d'unification.

Quelle est, actuellement, la théorie la plus en vogue pour unifier les forces de la physique ?

C'est sans conteste la théorie des cordes, esquissée à partir des années 1960 par le physicien italien Gabriele Veneziano, mais développée surtout dans les années 1980 et 1990 — période de grand enthousiasme quant à la possibilité de réunir dans un même cadre toutes les interactions fondamentales incluant une description quantique de la gravitation. Cette théorie y parvient en considérant les particules élémentaires non plus comme des objets ponctuels mais des cordes vibrantes infinitésimales. Elle nécessite toutefois, dans la lignée de Theodor Kaluza, des dimensions supplémentaires compactifiées et repliées sur elles-mêmes… au nombre de six voire sept, portant à dix ou 11 le nombre total de dimensions ! Malgré sa position dominante et les centaines de chercheurs qui y travaillent depuis une quarantaine d'années, cette théorie est confrontée à une foule de problèmes. Elle présente notamment des milliards de milliards de versions possibles — et donc autant de modèles d'univers — sans expliquer lesquelles il faudrait choisir. Elle implique aussi l'existence de nouvelles particules, dites supersymétriques, qui auraient dû être découvertes depuis une dizaine d'années au LHC, l'accélérateur de particules du Cern, près de Genève. Or, celui-ci n'en a décelé aucune trace.

Existe-t-il d'autres théories quantiques de la gravitation ?

Sa grande rivale est la gravité quantique à boucles, élaborée à la fin des années 1980 par plusieurs physiciens dont l'Italien Carlo Rovelli. Elle s'inscrit beaucoup plus dans la philosophie des travaux d'Einstein, qui souhaitait tout géométriser. Pour quantifier la gravitation, cette théorie cherche en effet à quantifier l'espace et le temps eux-mêmes, en présumant que la texture de l'espace-temps n'est pas lisse et continue mais granulaire. Chaque « grain » élémentaire d'espace est ainsi représenté par une boucle infinitésimale et l'espace par un réseau discontinu de nœuds interagissant et évoluant par petits sauts temporels ! Mais il y a d'autres théories, comme la gravité émergente, la gravité à sécurité asymptotique ou encore la géométrie non commutative du Français Alain Connes — peut-être ma préférée — où l'espace devient pour ainsi dire « flou » à très petite échelle. On le voit : les candidats ne manquent pas pour accomplir le rêve inassouvi d'Einstein ! Aussi fascinantes que soient ces constructions intellectuelles, elles se heurtent toutes néanmoins au problème de la vérification expérimentale. Et alors que cette quête visait originellement à unifier la physique, on a le sentiment qu'elle a produit plutôt à ce stade une grande dispersion de concepts et d'idées.

Se pourrait-il qu'une théorie du tout n'existe pas ?

Cette expression a quelque chose de naïf ou très prétentieux. Si les théoriciens parviennent un jour à réunir les quatre forces de la physique dans un même formalisme, celui-ci ne dira pas tout sur l'Univers, ne répondra pas à toutes les questions de l'humanité. Car les différentes strates du réel sont profondément imbriquées, et un phénomène physique, quel qu'il soit, ne pourra jamais être décrit de manière absolument complète. Cela précisé, il n'est pas impossible que la théorie unitaire recherchée par Einstein et tant de physiciens n'existe tout simplement pas. Ils ont certes de bonnes raisons de poursuivre cette quête, mais les déceptions et impasses de la théorie des cordes et d'autres prétendantes ont instillé le doute. Il ne peut être exclu que la gravitation soit une manifestation de la nature totalement indépendante des trois autres forces fondamentales. Et non l'émanation d'une théorie unifiée d'ordre supérieur, dont la poursuite correspondrait à un désir fantasmatique des physiciens. ■

Propos recueillis par F. D.

Dans les villes vertes et intelligentes de demain

Le cinéma et la littérature ont popularisé des modèles urbains idéaux, tantôt automatisés par des technologies futuristes, tantôt réconciliés avec la nature. Les nouvelles villes en Corée du Sud, aux États-Unis ou en Arabie saoudite confirment-elles cette vision ?

En partie inspirés par la science-fiction, modelés par l'urgence climatique et accélérés par la révolution numérique, les projets de villes de demain misent sur la technologie, l'écologie et le bien-être collectif pour réinventer la vie citadine. En plein développement, ces laboratoires d'innovation urbaine visent d'abord à adapter nos métropoles minéralisées et polluantes à la crise environnementale majeure que nous traversons. Dans un mouvement parallèle, les données et l'IA apportent un grand nombre de nouveaux services qui améliorent le fonctionnement des villes. Au croisement de ces deux tendances, à quoi pourrait ressembler la ville de demain ?

Pour contrer les effets du changement climatique, l'intensification de la nature en ville fournit aux citadins un glacis protecteur face à l'augmentation des températures. La végétalisation permet en effet de refroidir sans polluer un bâtiment de 3 à 5 °C, selon l'étude « Agir pour le rafraîchissement urbain » de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe). Les plantes ont pour autre avantage de capter le CO_2 présent dans l'atmosphère grâce à la photosynthèse, et d'aspirer la plupart des polluants. Un arbre en ville piège en moyenne 100 grammes de particules fines par an, selon cette même étude. À Paris, la superficie consacrée aux parcs et espaces verts a augmenté de 77,7 hectares depuis 2001, l'équivalent de cinq terrains de football chaque année, selon les chiffres de l'Atelier parisien d'urbanisme (Apur). En complément, 130 000 nouveaux arbres ont été plantés dans la capitale depuis fin 2020, portant leur nombre à plus de 500 000. Ce virage vers le vert est observable partout dans le monde.

STEFANO BOERI ARCHITETTI

SMART FOREST CITY MEXIQUE

La ville-forêt qui veut réconcilier urbanisation et écologie

Prévue pour être construite dans la région de Cancún par l'architecte italien Stefano Boeri, Smart Forest City (*ci-dessous, vue d'artiste*) est un projet de ville-forêt inspiré par la façon de construire des Mayas, qui sera capable d'accueillir 130 000 résidents d'ici à la fin de la décennie. Conçue comme un écosystème régénératif, elle s'étendra sur 557 hectares, dont une part importante sera végétalisée. Les surfaces réservées à la nature et celles destinées à la construction seront équivalentes afin de trouver le juste équilibre entre urbanisation et écologie. Par ailleurs, la ville vise l'autosuffisance énergétique grâce à un immense anneau périphérique de panneaux solaires et à un système de canaux souterrains pour irriguer de façon économe et durable les espaces verts.

WOVEN BY TOYOTA, INC.

WOVEN CITY JAPON

La ville intelligente selon Toyota

Construit par le constructeur automobile Toyota aux pieds du mont Fuji, ce laboratoire de l'innovation urbaine, d'une superficie de 70 hectares, a pour objectif de développer de nouveaux usages numériques et à faible empreinte carbone qui amélioreront la vie citadine. Tous les bâtiments ont été conçus avec des biomatériaux et sont alimentés par des énergies renouvelables. Chaque logement est équipé de technologies domotiques avancées qui optimisent la consommation d'eau et d'électricité, régulent le tri des déchets et anticipent les besoins des résidents. Dans l'espace public, une grande variété de capteurs interconnectent infrastructures, véhicules et habitants pour faciliter la circulation, garantir la sécurité des piétons et mieux gérer les ressources énergétiques. La première phase des travaux a été achevée en 2025. D'ici à quelques années, Woven City accueillera 2000 habitants.

Autre évolution majeure, les données numériques et l'IA sont en train de devenir un outil de transformation urbaine à part entière. La multiplication des capteurs et des objets connectés, le déploiement de réseaux mobiles et d'environnements *cloud* plus performants améliorent le fonctionnement des villes. Cette nouvelle architecture technologique permet notamment de fluidifier le trafic automobile. Ainsi, selon l'étude « L'impact de l'intelligence artificielle sur les smart cities » du cabinet français The Reveal Insight Project, les zones équipées de système d'analyse prédictive et d'ajustements dynamiques présentent un temps de trajet moyen inférieur de 15 %. À Los Angeles (États-Unis), la gestion adaptative des feux de signalisation a fait baisser de 12 % le temps passé dans les transports. Testée à Manchester (Royaume-Uni), la technologie Green Light de Google améliore de 30 % la fluidité aux intersections, réduisant ainsi l'attente aux feux pour les automobilistes.

Des infrastructures conçues pour émettre moins de CO_2

Par ailleurs, le numérique permet d'accélérer la mise en œuvre des innovations de pointe — véhicules autonomes, drones, systèmes domotiques avancés — afin de proposer des services toujours plus automatisés et toujours plus personnalisés. C'est ce que promettent les villes nouvelles de Songdo, en Corée du Sud, et de Woven City, au Japon.

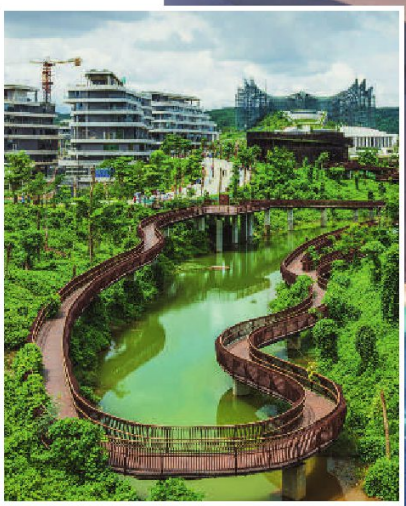
Au croisement de la révolution numérique et des enjeux climatiques, l'utilisation vertueuse des données et des algorithmes favorise par ailleurs l'apparition d'une ville mieux armée pour mener la bataille de la neutralité carbone. En équipant chaque bâtiment de capteurs, il est possible de faire baisser les émissions de CO_2 en optimisant la consommation d'électricité. À Grenoble, l'immeuble IntenCity, conçu par Schneider Electric, utilise le système de pilotage intelligent EcoStruxure Building pour calibrer l'éclairage et le chauffage en évitant tout gaspillage, grâce à 60 000 données collectées (température, luminosité, présence, etc.) toutes les deux minutes. En Europe, c'est l'immeuble qui affiche la meilleure performance énergétique. Il ne consomme que 37 kWh par m^2 et par an, soit presque dix fois moins que les autres bâtiments tertiaires de ce type. Avec le changement climatique, l'architecture et les data vont devenir indissociables car en étant réunies, elles permettront de tendre plus efficacement vers la sobriété. C'est le pari que fait le gouvernement indonésien en construisant Nusantara, nouvelle capitale verte et high-tech de l'archipel.

Mieux prendre en compte les besoins de chacun

Depuis le XX^{e} siècle et l'organisation des villes en fonction des axes de circulation, les citadins qui vivent dans les quartiers centraux et à proximité des lignes de métro peuvent profiter de toutes les commodités — commerces, écoles, complexes sportifs, lieux culturels — dans un périmètre restreint. Dans les périphéries et les banlieues, la situation est inverse, avec des quartiers situés loin de tout.

Afin de corriger le tir, la ville du quart d'heure, théorisée par l'urbaniste Carlos Moreno en 2015, propose un modèle égalitaire en rapprochant les services à moins de quinze minutes à pied pour chaque habitant. Un cran plus loin, la démocratie participative réinvente la façon de décider en incluant les citadins dans les grandes orientations stratégiques des municipalités. Grâce aux applications citoyennes, comme Agora ou ConsultVox, la gouvernance devient horizontale afin de mieux prendre en compte les besoins de chacun. Le fonctionnement des villes tend actuellement vers une plus grande égalité.

Qu'elle soit technologique, renaturée ou égalitaire, la ville de demain sera avant tout intelligente et résiliente, c'est-à-dire capable de prendre soin des populations qui y vivent, de faire face au changement climatique, et de fonctionner dans des conditions plus difficiles. ■ **Arnaud Pagès**

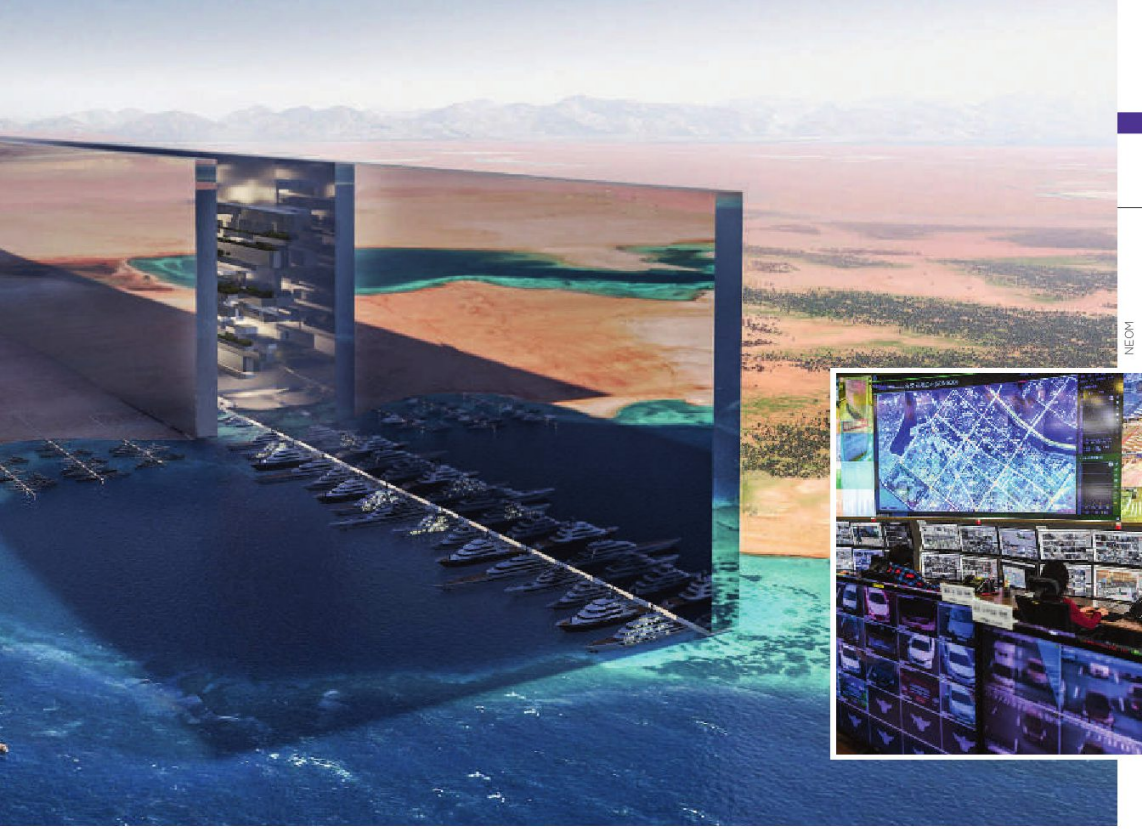


CREATIVICA XERAVIN/ ALAMY/ PHOTOI2

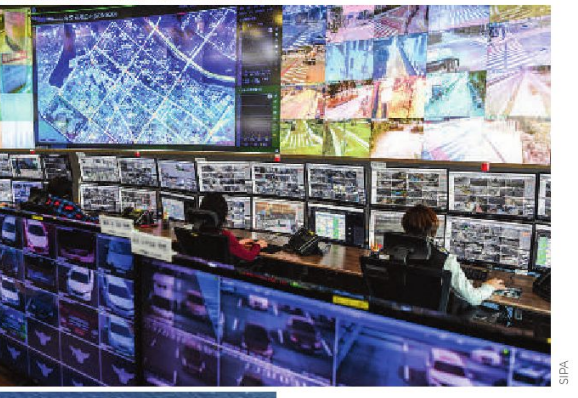
NUSANTARA
INDONÉSIE

Une nouvelle capitale verte

Encore en développement, Nusantara, dont le nom signifie archipel en sanskrit, a été pensée pour être la future capitale politique de l'Indonésie. Située sur l'île de Bornéo, elle est destinée à remplacer Jakarta, mégapole surpeuplée de 30 millions d'habitants qui est menacée par la montée des eaux. C'est la première fois que le réchauffement climatique justifie le déplacement d'une capitale. D'une superficie de 2561 km^2, Nusantara accueillera à terme environ 5 millions d'habitants. Le modèle de développement urbain qui a été choisi est celui d'une ville écologique et high-tech, intelligente et inclusive, en grande partie végétalisée, maillée de forêts et de parcs, massivement alimentée par les énergies renouvelables, et sillonnée par des véhicules autonomes.



NEOM



SIPA

THE LINE
ARABIE SAOUDITE

Une structure urbaine inédite

En construction en Arabie saoudite, The Line (*ci-dessus, vue d'artiste*) est une structure urbaine linéaire de 170 km de long, constituée de deux gratte-ciel parallèles hauts de 500 m, qui a été pensée pour abriter 9 millions de personnes en 2045. La façade extérieure réfléchissante servira de bouclier thermique. La ville proposera logements, espaces verts, commerces, et infrastructures publiques. The Line étant dépourvue de routes, donc de voitures, la mobilité des résidents reposera sur des transports automatisés et une ligne de train à grande vitesse qui reliera les extrémités en 20 minutes. Chaque service de base sera accessible en moins de cinq minutes à pied. La végétalisation, le déploiement massif d'énergies renouvelables, l'absence de véhicules polluants et l'utilisation de l'IA pour optimiser la consommation des ressources visent à en faire une ville écologiquement exemplaire. En raison du coût des travaux, estimé entre 100 et 200 milliards de dollars, les objectifs de peuplement viennent d'être revus à la baisse.

TELOSA
ÉTATS-UNIS

Des citadins actionnaires de leur ville

Imaginé par l'homme d'affaires Marc Lore, Telosa sera dotée d'un modèle de gouvernance « équitiste », inspiré par les principes georgistes de meilleure répartition du capital. Les citadins deviendront actionnaires de leur ville, bénéficiant ainsi de services publics gratuits et de technologies avancées financées par l'impôt foncier. L'objectif est de proposer un nouveau modèle de société, où la richesse est créée et redistribuée de manière équitable. Le cabinet d'architectes Bjarke Ingels Group (BIG), qui a été mandaté pour mener les travaux, prévoit que la ville soit construite sur des terres désertiques. Celles de l'Utah, de l'Idaho, du Nevada, de l'Arizona, du Texas et des Appalaches sont des emplacements potentiels.
La première phase de construction devrait accueillir 50 000 personnes dans les prochaines années.

SONGDO
CORÉE DU SUD

La smart-city coréenne

À environ 60 km au sud de Séoul, Songdo, le projet de smart-city, lancé dès 2001 sur 600 hectares de terres gagnées sur la mer, abrite aujourd'hui 76 000 personnes. La ville est équipée de 500 000 capteurs et d'un centre de contrôle intégré qui collectent et traitent en permanence une immense quantité de données afin de fluidifier le trafic automobile, optimiser la consommation énergétique, régler l'éclairage public et garantir la sécurité des habitants. Les constructions respectent des normes environnementales élevées et sont certifiées LEED (Leadership in energy and environmental design) en intégrant des panneaux solaires, des toitures végétalisées ainsi que des dispositifs de récupération des eaux pluviales et de recyclage des eaux grises. Chaque bâtiment est équipé d'un système d'évacuation pneumatique des déchets, qui sont collectés et acheminés *via* des réseaux souterrains vers des centres de tri et de traitement.

Avec les limiers du traçage de la cocaïne

Ce psychotrope envahit la France. Pour aider les enquêteurs à cartographier les filières, les scientifiques de la gendarmerie nationale font appel aux dernières technologies de profilage. Visite du laboratoire de toxicologie-stupéfiants de Pontoise.

C'est d'abord l'odeur âcre du cannabis qui surprend dans le premier local du laboratoire de toxicologie-stupéfiants de l'Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale (IRCGN), créé en 1987 et installé depuis l'été 2015 à Pontoise (Val-d'Oise). *« Voici la pièce où les scellés attendent d'être analysés,* annonce le capitaine Ambroise. *Il s'agit des produits saisis par les enquêteurs et susceptibles de contenir des stupéfiants.* » Outre le cannabis et autres substances psychoactives, la cocaïne qui nous intéresse aujourd'hui s'y trouve sous toutes sortes de formes : *« Il y a de la poudre libre ou bien encapsulée dans des ovules pour être transportée* in corpore. *On en retrouve aussi dissimulée dans du liquide, souvent de l'alcool : vin, rhum… Les trafiquants peuvent en transporter en moyenne 500 grammes par litre.* » Pour faire parler ces échantillons, la gendarmerie nationale les confie aux chimistes du laboratoire. Leur mission : analyser leurs composants le plus finement possible. *« Nous cherchons à mettre en évidence des similitudes entre échantillons pour établir d'éventuels liens entre des affaires judiciaires* », précise le gendarme en déverrouillant le sas qui sépare la pièce de la salle de dépistage. C'est seulement derrière cette porte et selon des protocoles stricts que les échantillons pourront être ouverts : *« On doit à tout prix éviter les contaminations,* souligne le capitaine. *Au risque, sinon, que tout soit positif !* » Des précautions également indispensables pour que les techniques mises en œuvre ne puissent être remises en cause par les parties d'un dossier judiciaire.

ARCHIVAGE

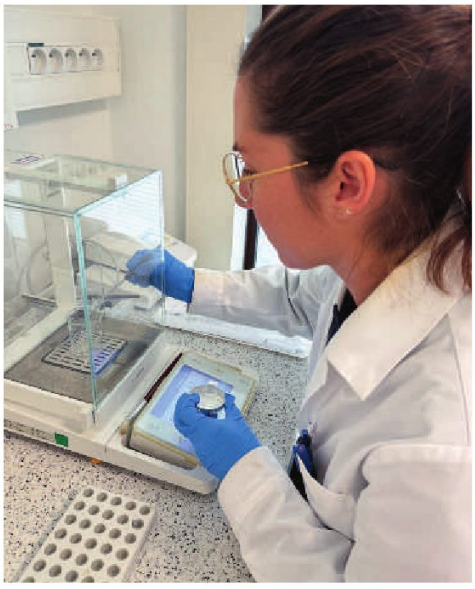
Une base de données des signatures chimiques

Depuis 15 ans que l'IRCGN pratique le profilage de stupéfiants, 300 échantillons des deux molécules suivies — cocaïne et héroïne — ont pu être enregistrés chaque année dans une base de données. Associée à une application pour le profilage et la comparaison inter-échantillons (APCI), elle permet de comparer rapidement les signatures chimiques des produits saisis et de signaler des concordances à même de relier deux affaires ou deux individus dans une même affaire.

Outre protéger la preuve, il faut aussi penser à la sécurité des techniciens *« car on ne sait pas à l'avance à quoi on a affaire,* prévient le guide. *Et, même connus, certains des produits restent hautement toxiques.* » Par exemple, le Fentanyl, un opioïde jusqu'à 100 fois plus puissant que la morphine et dont le contact, avec à peine deux milligrammes, peut suffire à tuer un adulte.

Isoler la substance psychoactive des produits de coupage

Tout est ainsi ouvert sous hotte. D'abord pesé, mesuré et photographié pour être décrit, le produit passe ensuite au crible des spectromètres : *« Nous utilisons soit la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, soit la technique de diffusion Raman, ou encore la mobilité ionique* », précise celui qui par ailleurs est chimiste de formation. Dans les deux premiers cas, il s'agit de révéler la signature caractéristique d'une molécule, et notamment son mode vibratoire, en l'excitant avec de la lumière infrarouge ou du laser. Et la troisième technique ? *« On la privilégie lorsque l'échantillon recueilli est à l'état de trace car elle est plus sensible* », répond le capitaine. Ici,



Au sein du laboratoire de toxicologie de l'Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale, à Pontoise, la salle des scellés (ci-contre) abrite toutes sortes de stupéfiants potentiels prêts à être analysés. Pour protéger les techniciens, la pesée, la mesure et les photographies des échantillons s'effectuent sous hotte (en bas à gauche).

l'échantillon est vaporisé puis ionisé par une source électrique. Les molécules révèlent alors une vitesse caractéristique en quelques secondes.
Simples, rapides, peu coûteux, au besoin facilement transportables sur le terrain, ces appareils donnent une première orientation. *« On doit ensuite confirmer le résultat avec des machines plus spécifiques »*, précise-t-il en désignant un chromatographe, appareil qui permet la séparation des constituants d'un mélange en phase liquide ou gazeuse. Ici, c'est la substance psychoactive elle-même qu'on cherche à séparer des produits de coupage ayant pu être ajoutés par les trafiquants : *« On trouve de tout,* soupire le gendarme. *Du sucre jusqu'aux vermifuges pour le bétail. »* La technique permet également d'identifier des alcaloïdes secondaires, des molécules présentes dans la plante et conservées lors du processus de fabrication de la poudre. Bombardées dans un spectromètre, ces impuretés résiduelles révèlent un temps de sortie et un fractionnement caractéristiques. *« Quel que soit le laboratoire au monde dans lequel la manipulation est réalisée, on obtient toujours le même résultat caractéristique,* explique le gendarme. *Cela nous permet d'alimenter des bases de données partagées très robustes. »*

La spectrométrie de masse des rapports isotopiques participe à déterminer l'origine géographique d'un échantillon de cocaïne.

Fiable, la procédure est relativement longue à mettre en œuvre, et c'est pourquoi le laboratoire dispose de plusieurs appareils du même type pour pouvoir analyser plusieurs échantillons en même temps. *« Nous devons être capables de traiter les dossiers dans le temps de la garde à vue, soit en moins de 24 à 48 heures »*, explique-t-il.

Chaque lot possède une signature chimique unique

À ce stade, notre échantillon est maintenant formellement identifié comme de la cocaïne. Reste à évaluer sa pureté, même si cette information est devenue moins stratégique pour les enquêteurs. En effet, si la teneur permet de faire la différence entre la cocaïne du consommateur et celle de la tête du trafic, cette donnée s'avère moins pertinente sur le marché actuel, envahi par une cocaïne pure à 70 % en moyenne. *« Ce sont les informations obtenues grâce à des méthodes complémentaires qui nous permettent de continuer à apporter des éléments éclairants aux enquêteurs »*, explique le capitaine.

Au nombre de ces techniques, le profilage chimique, en usage depuis 2010 et qui offre un véritable code-barres propre à chaque lot saisi. Comment ? En faisant à nouveau appel au chromatographe gazeux, pour caractériser certains des alcaloïdes secondaires. Car connaître les composants d'un échantillon permet d'établir des liens au lot près. Produit au même moment et au même endroit, chaque lot possède en effet une signature chimique unique, comme l'explique le capitaine Anna : *« Pour fabriquer sa cocaïne, le trafiquant utilise la même technique. Mais il se peut qu'il ait pris un solvant A pour fabriquer un premier lot, et un solvant B pour le lot suivant, qu'il n'ait pas mis exactement le même volume, ou encore que, l'une des fois, sa cuve ait été mal rincée… »*. Autant de précieux éléments discriminants que le laboratoire pourra exploiter et entrer dans sa base de données *(lire l'encadré p. 46)* afin d'informer l'enquêteur en cas de concordance. Malgré toutes les précautions prises par les narcotrafiquants pour brouiller les pistes, ces signatures sont infalsifiables et contiennent des informations essentielles.

Identifier les réseaux de distribution

C'est pourquoi les chimistes de l'IRCGN cherchent en permanence de nouvelles technologies à même de révéler ces caractéristiques. Parmi elles, développé par l'agence américaine antidrogue (DEA) et en phase de validation à l'IRCGN, le profilage isotopique que la gendarmerie nationale cherche à mettre en œuvre le plus rapidement possible dans les enquêtes en France. Destiné prioritairement aux saisies de grands volumes, il permettra de fournir des informations sur les flux des trafics, évaluer les mouvements de la cocaïne et identifier des réseaux de distribution et d'approvisionnement. *« Le profilage isotopique permet de faire parler la structure même de la molécule de cocaïne d'un échantillon et, combiné aux techniques de profilage chimique évoquées précédemment, d'en déduire l'origine géographique de la plante utilisée »*, explique le capitaine Anna.

Ce sont les rapports isotopiques dans la plante qui nous donnent ces informations, influencés au cours de la croissance par l'environnement (altitude, hygrométrie, nature du sol, engrais utilisés) et qui conservent les mêmes caractéristiques, de la feuille de coca d'origine à la poudre de cocaïne. Déjà en usage pour vérifier la provenance de produits comme le vin ou la vanille, la spectrométrie de masse des rapports isotopiques est également utilisée dans l'étude des sols pour la médecine légale policière, mais pas encore pour les stupéfiants. Impatiente de la voir mise en œuvre, le capitaine Anna espère *« qu'elle pourra aider à stopper le trafic le plus en amont possible »*. ■

Texte et photos : Natacha Scheidhauer

> « Nous devons être capables de traiter les dossiers dans le temps de la garde à vue, soit en moins de 24 à 48 heures »
>
> **Capitaine Ambroise,** Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale, à Pontoise (Val-d'Oise)

Sophia Boutique, la boutique des lecteurs de SCIENCES ET AVENIR

OFFRE SPÉCIALE

La montre et le bracelet

La montre :
- Mouvement à quartz 3 aiguilles
- Boîtier en alliage doré 24 x 36 mm
- Bracelet maille milanaise finition dorée

Le bracelet :
- Jonc en alliage finition dorée
- Pierre verte en acrylique
- Strass cristal en verre

La montre Baltique

- Mouvement à quartz 3 aiguilles
- Cadran aspect graphite
- Aiguilles et index luminescents
- Boîtier 42 mm
- Bracelet en croûte de cuir façon daim

La montre chrono Circuit

- Mouvement à quartz 5 aiguilles
- Chronographe au 1/10ème/s
- Boîtier 42 mm
- Bracelet en cuir lisse fauve

La sacoche multi-poches

- Cuir véritable grainé
- Bandoulière réglable
- 2 compartiments
- Doublure en polyester
- Dimensions : 19 x 15 x 6 cm

Tous nos produits sont garantis 2 ans - Délais de livraison : 15 jours maximum - Dans la limite des stocks disponibles

photos non contractuelles

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à :
SOPHIA BOUTIQUE
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code Postal

Ville :

Téléphone

E-mail : @

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre email

☐ J'accepte de revoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique.

DÉSIGNATION	RÉF	QTÉ	PRIX	TOTAL
La montre et le bracelet	V176		39€	€
La montre Baltique	V170		29€	€
La montre chrono Circuit	V217		49€	€
La sacoche multi-poches	V195		39€	€
Frais d'envoi				OFFERTS
TOTAL DE MA COMMANDE				€

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par chèque à l'ordre de **Sophia Boutique**

Pour régler par carte bancaire merci de contacter le 01 55 56 70 54 en précisant le code PSCA946, ou rdv sur www.sophia-boutique.com

PSCA946

Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives postmortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

JEAN-BAPTISTE STROBEL / BIOSPHOTO

Seule la surveillance étroite d'une espèce dans son milieu, en toutes saisons et sur une longue durée, permet aux chercheurs (ici ceux de l'Institut polaire norvégien lors d'une expédition au Spitzberg) de suivre son déclin.

Biodiversité

Faut-il craindre une nouvelle extinction de masse ?

L'activité humaine menace d'extinction un nombre croissant d'animaux et de végétaux. Mais les chercheurs sont confrontés à la difficulté de quantifier ce monde vivant de plus de dix millions d'espèces. Et, contrairement au changement climatique évalué grâce à un indicateur universel, la tonne de CO_2, la biodiversité est plus ou moins riche selon les climats ou les reliefs, et varie fortement entre les milieux marins et terrestres. Explications.

Par Loïc Chauveau

Les insectes ne maculent plus les pare-brise des autos l'été, les alouettes sont de moins en moins nombreuses dans les champs, le lapin de garenne a quasiment disparu des tableaux de chasse, sardines et anchois désertent le golfe du Lion. L'être humain ferait-il le vide autour de lui ? Ces quelques exemples français se déclinent à l'envi dans le monde entier. Les populations animales et végétales régressent partout. Faisons-nous face à une « sixième extinction de masse » ?

Alors que nombre de livres ont, depuis une trentaine d'années, affirmé qu'elle est désormais bien en cours, deux chercheurs de l'université de l'Arizona (États-Unis), John Wiens et Kristen Saban, affirment qu'au contraire, la biodiversité serait stable avec un taux de disparition naturelle des espèces inférieur à 0,1 % ces 500 dernières années, soit largement en dessous des 75 % requis par les critères géologiques. De plus, selon ces chercheurs, plus de la moitié des espèces déclarées éteintes vivaient dans des îles, espaces restreints où les animaux ne peuvent étendre leur aire de répartition. *« Des études récentes suggèrent que des extinctions de genres entiers d'animaux sont en train de s'accélérer et que ces extinctions mettent en danger la survie de l'humanité. Nous trouvons au contraire que les extinctions de genres sont très rares parmi les plantes et les animaux, qu'elles se déroulent généralement dans des îles et que ces extinctions sont actuellement en train de ralentir lors de ces 100 dernières années au lieu d'accélérer »*, affirme ainsi John Wiens, lors de la parution de son dernier article sur le sujet, dans la revue *Plos* en septembre. Ce ralentissement serait notamment attribué au succès des politiques de préservation des espèces et de leur habitat.

Ces affirmations ont fait bondir nombre de naturalistes qui y ont décelé l'émergence d'une opposition ▸

REPÈRES

Les cinq extinctions de masse

L'ORDOVICIEN (-445/-443 MILLIONS D'ANNÉES)
85 % des espèces marines disparaissent. La crise est due à une glaciation qui provoque une baisse du niveau des mers, et donc une réduction des habitats marins. Elle est suivie d'une remontée rapide des eaux qui provoque un appauvrissement en oxygène de l'océan.

Illustration : un graptolite

BRUNO BOURGEOIS

LE DÉVONIEN (-375/-360 MILLIONS D'ANNÉES)
L'extinction massive touche les espèces marines et épargne les plantes et les arthropodes terrestres. Après un réchauffement des températures, des chutes de météorites conduisent à un refroidissement brutal du climat.

Un corail tabulé

LE PERMIEN (-250 MILLIONS D'ANNÉES)
C'est la plus grande crise subie par les espèces terrestres. Des éruptions volcaniques majeures provoquent la baisse de la température du fait de l'occultation du rayonnement solaire. L'impact d'une météorite géante est discuté. 90 % des espèces disparaissent.

Un tribolite

LE TRIAS (-201 MILLIONS D'ANNÉES)
C'est la crise qui évince les tétrapodes au profit des dinosaures. 95 % des plantes à feuilles sont remplacées par des fougères. La Terre est frappée par cinq grandes météorites. Leur responsabilité est discutée, la place du volcanisme débattue : les causes de cette extinction restent mal connues.

Une ammonite

LE CRÉTACÉ (-66 MILLIONS D'ANNÉES)
C'est l'extinction des dinosaures qui laissent la place aux mammifères. Elle est attribuée aux seules chutes d'une ou plusieurs météorites. Mais il est plus probable que leur disparition soit due à un lent changement climatique qui a fait diminuer leur nombre.

Un rhabdodon

idéologique proche du climatoscepticisme. *« On tord les faits scientifiques pour défendre une thèse qui va accélérer le déclin du vivant,* redoute Benoît Fontaine, chercheur au Centre d'écologie et des sciences de la conservation (Cesco) au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN). *Comment, en effet, convaincre des industriels de faire attention à la nature si des scientifiques leur disent que tout ça n'est pas si grave ? »*

Une notion qui s'appuie sur des données paléontologiques

Le débat est d'autant plus vif qu'il ne peut s'appuyer sur des bases solides. *« La grande difficulté pour les scientifiques, c'est de pouvoir mesurer l'état de la biodiversité,* reconnaît le naturaliste Bruno David, ancien président du MNHN. *La nature, ce sont des millions d'espèces qui interagissent entre elles et avec leur milieu dans des relations complexes de prédation ou de mutualisation que nous sommes loin de comprendre entièrement. »* Au contraire du changement climatique évalué grâce à un indicateur simple et universel — la tonne de CO_2 —, la biodiversité est plus ou moins riche selon les climats, les reliefs, la quantité d'eau disponible, et varie fortement entre les milieux marins et terrestres. Au dernier comptage de 2025, 2 157 000 espèces animales et végétales ont été décrites par les scientifiques. Or, leur nombre total excéderait largement les dix millions.

La notion d'« extinction de masse » s'appuie sur des données paléontologiques. Au cours des 4,5 milliards d'années de son histoire, la planète en a connu cinq *(lire l'encadré ci-dessus)*. Les couches géologiques correspondantes montrent une disparition de 75 % des espèces en un million d'années au minimum, soit un laps de temps court à l'échelle géologique. Ces critères sont ceux utilisés par la communauté des biologistes pour caractériser la survenue de la sixième extinction. La seule tentative sérieuse de documen-

BRUNO DAVID

« La nature, ce sont des millions d'espèces qui interagissent entre elles et avec leur milieu dans des relations complexes »
Bruno David, naturaliste, ancien président du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

PIERRE LARRIEU / HANS LUCAS

L'artificialisation des sols (ici le chantier de la future autoroute A69 entre Toulouse et Castres) participe à l'extinction des espèces en réduisant leur surface d'habitat.

ter la disparition d'une espèce revient à l'Union internationale de conservation de la nature (UICN) et à sa « liste rouge » classant les populations en neuf catégories, de « préoccupation mineure » à « éteinte », en passant par « en danger » ou « vulnérable ». Au dernier pointage, l'organisme onusien a évalué les populations de 172 620 espèces. 48 646 d'entre elles sont considérées comme menacées d'extinction à l'échelle mondiale. 926 ont été déclarées « éteintes ». Pour être certain de cette perte définitive, les chercheurs, les naturalistes amateurs, les gestionnaires d'espaces naturels s'appuient sur une méthode draconienne. Il faut en effet qu'une surveillance étroite de l'habitat connu ou suspecté d'une espèce ait échoué à enregistrer la présence d'un individu de jour comme de nuit, en toutes saisons et sur plusieurs décennies couvrant de nombreuses générations.

Si c'est bien sur ces données que se sont appuyés les deux chercheurs de l'université de l'Arizona, Benoît Fontaine, avec ses collègues Philippe Bouchet (MNHN) et Robert Cowie, de l'université d'Hawaii (États-Unis), ont vivement répondu à leurs conclusions. *« Le principal reproche que nous faisons, c'est que ces travaux s'appuient uniquement sur la liste rouge qui évalue les statuts de conservation d'environ 7 % des espèces connues et probablement moins de 2 % du nombre total des espèces réellement existantes.* » Outre que l'UICN s'intéresse principalement à des populations de vertébrés (les mammifères et les oiseaux sont très bien évalués), des pans entiers de la biodiversité — mollusques, insectes, reptiles — sont peu étudiés du fait de la taille des animaux, de la complexité des recherches et du peu de personnel pour les mener. Difficile, donc, de s'appuyer sur les espèces évaluées quand des genres entiers ne sont ni surveillés, ni même connus de la science.

Ce sont justement ces difficultés qui ont amené la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), groupe international d'experts de la biodiversité, à se montrer d'une extrême prudence dans ses avis. Le rapport sur l'état de la nature publié en 2019 et adopté par consensus affirme cependant que *« l'activité humaine menace d'extinction globale un nombre d'espèces sans précédent. En moyenne, 25 % des espèces appartenant aux groupes d'animaux et de végétaux évalués sont menacées, ce qui suggère qu'environ 1 million d'espèces sont déjà menacées d'extinction, beaucoup dans les décennies à venir »*. Tout le débat est là : comment passer de la « suggestion » à la certitude ? Comment mesurer l'évolution d'un tissu vivant de plus de dix millions d'espèces ?

10 millions d'espèces animales et végétales existeraient dans le monde.

2,15 millions d'espèces ont été décrites par les scientifiques.

172 620 espèces sont surveillées par l'Union internationale de conservation de la nature (UICN).

Mobiliser le plus grand nombre d'observateurs

« Des approches variées montrent toutes que la situation est critique », affirme avec force Benoît Fontaine. Et pour cela, des outils existent. Le premier, c'est la théorie de la biogéographie insulaire posée par les chercheurs Robert MacArthur et Edward Wilson en 1967. Elle établit une relation entre la surface d'un habitat et le nombre d'espèces présentes. Plus l'écosystème est petit, moins il y a d'espèces. *« Ce rapport a maintes fois été vérifié, notamment dans des zones en cours de déforestation où l'on constate que la fragmentation des habitats réduit le nombre d'espèces »*, table Benoît Fontaine. Une seconde voie consiste à faire appel aux sciences participatives. Il s'agit alors de mobiliser un grand nombre d'observateurs pour couvrir à intervalles réguliers de vastes portions de territoires. C'est ainsi que procède le MNHN, notamment pour son programme Stoc (*lire l'encadré p. 54*).

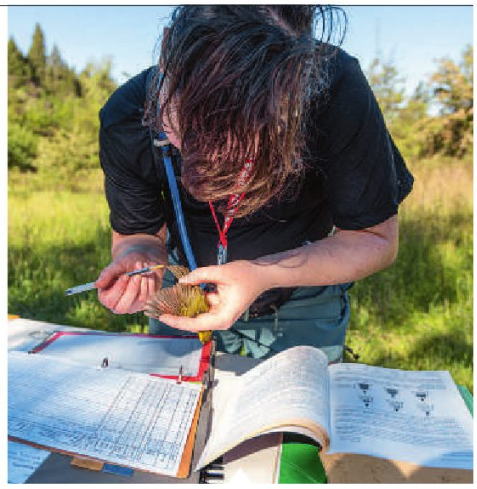
Caspar Hallmann, de l'université Radboud, à Nimègue (Pays-Bas), a utilisé en 2017 une autre méthode dont les résultats ont fait grand bruit. À 27 ans d'intervalle, le chercheur a procédé à des piégeages d'insectes dans 63 aires protégées d'Allemagne et il a pesé la

SCIENCE PARTICIPATIVE

Les chercheurs font appel aux volontaires

Le monde est vaste, les plantes et animaux nombreux, les chercheurs ne peuvent être partout. D'où l'idée de faire appel aux volontaires. Passionnés de nature, élèves et professeurs, associatifs, tout le monde peut participer à un programme scientifique. Le Muséum national d'histoire naturelle sollicite ainsi les bonnes volontés sur le suivi des oiseaux, la notation des dates de bourgeonnement et de fleurissement des plantes, la prise de photos d'insectes pollinisateurs, etc.* Les chercheurs fournissent le matériel et animent les plateformes de récolte des données. La démarche s'adresse autant à de parfaits béotiens qu'à des personnes ayant déjà acquis des compétences comme les ornithologues amateurs du réseau de suivi des oiseaux communs (Stoc), qui ont appris à reconnaître les chants des différentes espèces.

* www.mnhn.fr/fr/participer-a-la-science



PENNY COLLINS/NURPHOTO/AFP

Les données collectées par les volontaires permettent d'alimenter le suivi des oiseaux.

biomasse ainsi recueillie. Résultat : un déclin de 76 % des populations. Si la méthode ne dit rien des espèces plus ou moins en voie de disparition, elle indique cependant un effondrement alarmant dans des aires où, pourtant, il n'y a aucune activité humaine susceptible de perturber la faune.

« Homo sapiens », le principal responsable

Enfin, Robert Cowie, Philippe Bouchet et Benoît Fontaine ont apporté leur propre contribution en 2022. *« Pour estimer l'évolution globale des populations, nous avons utilisé les collections d'escargots des Muséums depuis le début du classement des espèces au XVIIIe siècle et nous avons pu ainsi déterminer où et quand dans le passé des individus avaient été collectés,* raconte Benoît Fontaine. *C'est ainsi que nous avons pu déterminer par extrapolation que ces 500 dernières années, entre 150 000 et 260 000 espèces tous genres confondus ont disparu, soit entre 7,5 et 13 % des 2 millions d'espèces décrites par la science, et bien plus que le petit millier d'espèces déclarées éteintes par l'UICN. »*

Cette évaluation est très éloignée des 75 % de disparitions qui signeraient une sixième extinction de masse. *« Mais on en prend tout droit le chemin si les humains ne réagissent pas »*, alerte Bruno David. Car le principal responsable du phénomène en cours, c'est *Homo sapiens*. Dans son rapport de 2019, l'IPBES liste les causes de la baisse des populations animales et végétales et les disparitions qui en découlent. En premier lieu, c'est la destruction des milieux par l'humain qui est pointée. *« Au total, 75 % de la surface terrestre est altérée de manière significative, 66 % des océans subissent des incidences cumulatives de plus en plus importantes et plus de 85 % de la surface des zones humides a disparu »*, révèle le rapport. Figurent ensuite les pollutions diverses par produits chimiques ou émissions de gaz nocifs, la dispersion des espèces invasives, la surexploitation des ressources (surpêche, extraction minière, agriculture intensive), et enfin le changement climatique. *« C'est cependant un facteur de plus en plus important avec l'augmentation continue de la température de la planète, qui perturbe les conditions de vie des animaux et des plantes »*, prévient Bruno David.

La convention onusienne sur la biodiversité a déjà compilé toutes les solutions permettant de préserver le tissu vivant de la planète : conversion de l'agriculture intensive, fin des extractions minières au profit de l'économie circulaire, préservation stricte des espaces naturels, etc. En 2023, les États se sont donné pour objectif de stopper l'érosion de la biodiversité d'ici à 2030. 170 milliards d'euros y seront consacrés tous les ans, mais les besoins réels sont estimés à 600 milliards. Des sommes qui devraient être prioritaires car la protection de la biodiversité, c'est aussi un moyen de lutter contre le changement climatique. C'est en tout cas la thèse de l'essayiste Frédéric Gruet : *« Plutôt que de considérer la crise de la biodiversité comme un simple volet de la crise climatique, pourquoi ne pas renverser la perspective ? Et si la crise climatique n'était que l'une des causes d'un problème plus large, celui de l'extinction du vivant ? Saurons-nous reconnaître cette urgence ? »* ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- **À l'aube de la sixième extinction,** Bruno David, Grasset, 2021.
- **Et si ce n'était pas le climat ?** Frédéric Gruet, ediSens, 2025.

BENOÎT FONTAINE

« Ces 500 dernières années, entre 7,5 et 13 % des 2 millions d'espèces décrites par la science ont disparu »

Benoît Fontaine, chercheur au Centre d'écologie et des sciences de la conservation (Cesco) au Muséum national d'histoire naturelle

La haute mer a enfin son cadre juridique

Ratifié par plus de 60 pays, le traité sur la haute mer entrera en vigueur début 2026 après vingt ans de tractations. Le texte vise à préserver les écosystèmes océaniques.

CHRISTOPH GERIGK / BIOSPHOTO

Le traité imposera de mentionner l'origine de toutes les molécules découvertes en haute mer afin de permettre un partage des connaissances et des bénéfices (ici la goélette « Tara » au large des îles Galápagos).

Le 19 septembre dernier, le secrétaire général des Nations unies António Guterres a annoncé que « l'accord sur la diversité biologique marine des zones ne relevant pas de la juridiction nationale » — également appelé traité sur la haute mer —, avait atteint le seuil requis de 60 ratifications, après le ralliement de la Sierra Leone et du Maroc. *« Lorsque la communauté internationale s'aligne autour d'objectifs communs comme celui-ci, cela génère une énergie capable de surmonter des années d'impasse diplomatique »*, a commenté sur le réseau LinkedIn la Seychelloise Angelique Pouponneau, négociatrice en chef pour l'Alliance des petits États insulaires. Le traité entrera en vigueur le 17 janvier 2026, et neuf mois plus tard devra se tenir la première conférence des parties (COP1), qui définira les institutions et les processus permettant de concrétiser ce nouveau texte juridique. La haute mer, qui représente les deux tiers de la surface de l'océan et 95 % de l'eau salée du globe, se situe au-delà de 200 milles nautiques (370 km) des côtes. Traditionnellement considérée comme un espace de liberté, elle était régie jusque-là par la convention des Nations unies sur le droit de la mer de 1982 (dite de Montego Bay) qui actait son accès et son utilisation libres à tous les États, qu'ils soient côtiers ou non. Mais depuis lors, les activités anthropiques s'y sont développées de manière exponentielle : aujourd'hui, près de 90 % du commerce mondial et environ 1,4 million de kilomètres de câbles sous-marins passent par la haute mer. L'augmentation des pollutions, les projets d'exploitation minière menacent la santé

de ses écosystèmes, largement méconnus. De plus, si la convention de 1982 définit les règles d'exploitation des sols et sous-sols marins, rien ne protégeait la colonne d'eau — le volume compris entre le plancher océanique et la surface. Un nouvel instrument juridique international s'imposait, mais il aura fallu près de vingt ans de discussions, dont cinq années de négociations, pour parvenir à l'adopter en 2023 — et deux de plus pour le ratifier.

Entre pays du Nord et du Sud, le principe du patrimoine commun

Ce nouveau traité repose sur quatre piliers. Le premier vise à partager équitablement les connaissances et les bénéfices issus de l'utilisation des ressources génétiques marines : face aux pays du Nord qui disposent de la technologie et des moyens pour exploiter les ressources génétiques, les pays du Sud ont obtenu l'application du principe du patrimoine commun. Le deuxième concerne la conservation et l'exploitation durable de la biodiversité marine, notamment avec la création d'aires marines protégées (AMP). Tertio, il est désormais obligatoire de réaliser les études d'impact environnemental des activités susceptibles d'affecter la biodiversité marine. Enfin, les pays du Nord devront faire progresser la science et renforcer les capacités des pays en développement par transfert de technologies pour leur permettre d'accéder à la haute mer.

Aujourd'hui, près de 90 % du commerce mondial et environ 1,4 million de kilomètres de câbles sous-marins passent par la haute mer

« Le plus important, et c'est une grande victoire, est que cet outil juridique respecte la liberté de la recherche, souligne André Abreu, directeur des politiques internationales à la Fondation Tara Océan. *Mais après chaque mission, nous devrons rédiger un rapport détaillé, précisant la localisation GPS de l'origine des échantillons. Cela va assurer la traçabilité des produits dérivés de ces échantillons. Si, par exemple, une entreprise pharmaceutique identifie une enzyme de plancton qui conduit à la mise au point d'un médicament, elle devra mentionner l'origine de la molécule dans tout brevet ou article scientifique.* » Lorsqu'elle commencera à engranger les bénéfices de cette découverte, elle devra alors en reverser entre 3 et 7 % afin d'alimenter le fonds spécial pour la haute mer.

Préserver 30 % des océans d'ici à 2030

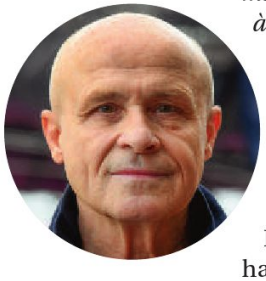
« Des chercheurs brésiliens ont reconstitué le génome d'une bactérie capable de dégrader des hydrocarbures en mer à partir des données d'une mission Tara, sans qu'aucun membre de cette mission soit impliqué, témoigne André Abreu. *Une fois nos données déposées dans les bases publiques, elles sont accessibles à tous. Si ces chercheurs collaborent avec une entreprise, qui dépose un brevet pour un produit de nettoyage des côtes en cas de marée noire, il est impossible de remonter à nos données, sauf déclaration explicite. Mais les taux de reversement instaurés par le traité sont si faibles que l'on pense que les entreprises préféreront communiquer sur la provenance de leur découverte plutôt que risquer leur crédibilité.* »

La protection de la biodiversité en haute mer est un nouvel outil pour atteindre l'objectif « 30 × 30 » du cadre mondial pour la biodiversité visant à protéger 30 % des terres et des océans d'ici à 2030. Selon le traité, seul un État, et non une ONG, peut proposer une AMP après consultation des États voisins de la zone concernée et des éventuelles organisations régionales. Ainsi, la France ne pourrait pas créer une AMP dans le sud de l'Atlantique sans l'accord du Brésil et de l'Afrique du Sud. L'examen de ces projets se fera lors des COP et leur adoption à la majorité qualifiée des trois quarts, ce

SUR LA SCÈNE DU FESTIVAL GRAND OCÉAN

OLIVIER POIVRE D'ARVOR
AMBASSADEUR POUR LES PÔLES ET LES OCÉANS

« La gouvernance des océans est devenue essentielle »


FRED TANNEAU / AFP

“ Il était surprenant d'arriver au début du XXIe siècle avec une haute mer — un espace aussi vierge — n'obéissant qu'à très peu de règles. Le traité maritime de Tordesillas (1494) avait en son temps partagé le monde entre Portugais et Espagnols. La situation menaçait de se reproduire, cette fois entre Chinois et Américains. C'est pourquoi la gouvernance des océans est devenue essentielle, à une époque où le multilatéralisme est devenu un « gros mot » pour certains pays. […] L'océan n'est pas forcément entre de bonnes mains : si l'on considère qu'il s'agit d'une copropriété mondiale, son premier copropriétaire — les États-Unis — est problématique ; heureusement, le deuxième — la France — s'est mobilisé, et c'est en grande partie grâce à cette dernière que ce traité a vu le jour. ”

Retrouvez l'intervention d'Olivier Poivre d'Arvor et toutes les conférences et débats de la 4e édition du festival Grand Océan organisé les 26 et 27 septembre par *Sciences et Avenir* et *La Recherche* : **sciav.fr/946grandocean**

MICHEL GUNTHER/BIOSPHOTO

L'aire marine protégée (AMP) de l'île de Pâques interdit toute exploration pétrolière et minière dans un sanctuaire de 720 000 km².

qui évite le blocage d'acteurs comme la Russie ou la Chine. Toutefois, *« la seule AMP qui devrait être réalistement approuvée d'ici à 2030, c'est celle du Chili qui regroupera trois zones déjà existantes de Valparaiso jusqu'à l'île de Pâques,* note André Abreu. *Il n'y a là nulle organisation régionale, ni autre pays ou petit territoire isolé concerné.* » Ailleurs, comme en mer de Chine ou en Arctique, les obstacles à la création de nouvelles AMP seront avant tout géopolitiques.

La création d'AMP classiques liées à une espèce menacée particulière est difficile à imaginer, la haute mer étant davantage un lieu de passage que d'habitat. À l'instar de celle du Chili, où la pêche reste autorisée par endroits, des dispositifs de protection mixtes semblent plus réalistes. Voire des AMP dynamiques, qui permettraient de déplacer les zones de restriction de la pêche dans l'espace et dans le temps, en fonction des conditions environnementales. C'est pertinent, notamment dans les régions où les *blooms* (efflorescences) planctoniques varient fortement. *« Par exemple, au large de Bahia Blanca dans l'Atlantique Sud, se forme le plus grand* bloom *de coccolithophores de l'océan, ce qui représente la zone de photosynthèse la plus étendue de la planète, active uniquement de novembre à janvier,* détaille André Abreu. *Si l'on interdisait aux navires-usines d'y pêcher à ces dates, on préserverait la capacité de l'océan à produire du phytoplancton, puis du krill et, par extension, l'ensemble de la chaîne alimentaire pélagique.* »

La course mondiale aux kilomètres carrés protégés

L'un des défauts de l'objectif 30 x 30 est d'avoir déclenché une course aux kilomètres carrés protégés, au détriment de la qualité scientifique, la pertinence écologique et le suivi réel des zones concernées. La France cherche ainsi à multiplier les AMP dans des zones éloignées ou inhabitées — Clipperton, dans le Pacifique Nord, les îles Éparses dans l'océan Indien, ou encore les Terres australes et antarctiques françaises —, parce qu'il est politiquement et socialement plus difficile d'en créer au large des côtes métropolitaines.

Le volet « études d'impact » du traité est relativement simple à mettre en œuvre. Cependant, la liste des activités concernées doit encore être débattue lors des prochaines COP et restera évolutive. Parmi les projets examinés, figurent notamment les initiatives de séquestration du carbone océanique, comme l'alcalinisation artificielle ou l'épandage de sulfates de fer (*lire* S. et A. *n° 945)*. L'étude d'impact pourrait restreindre leur réalisation si les risques sont trop élevés.

Quant au quatrième pilier du traité, qui vise à instaurer une coopération internationale pour la haute mer, il peine à trouver son financement. En attendant que les bénéfices des futures découvertes alimentent le fonds spécial pour la haute mer, le traité prévoit des contributions nationales. L'enjeu est de soutenir durablement la recherche et la formation dans les pays en développement, au-delà de la simple participation à des expéditions. Aujourd'hui, seuls une dizaine de pays disposent des infrastructures nécessaires pour mener des recherches en biologie moléculaire marine, dont l'Afrique du Sud — seul pays en Afrique —, et le Chili et le Brésil en Amérique du Sud. ■ **Sylvie Rouat**

Coup de chaud sur le vignoble bordelais

La sécheresse et les canicules de plus en plus fréquentes menacent tout particulièrement les vignes de bordeaux. Les scientifiques cherchent des solutions pour contrer leurs effets sur le profil aromatique typique de ces vins.

Pour les viticulteurs, l'année 2025 constituera une sorte de repère temporel. Ils s'en souviendront comme de l'année où le changement climatique aura montré un impact inédit sur la vigne. *« On n'a jamais vu des grains de raisin aussi petits et avec des degrés de maturité très différents. S'il a fallu vendanger dans le Bordelais dès la fin août, c'est parce qu'on a constaté des taux d'alcool très élevés dans la pulpe alors que la peau et les pépins, eux, n'étaient pas mûrs »*, témoigne Marie-Laurence Porte, œnologue au sein de la société Enosens. Des enseignements sont donc à en tirer, d'autant que la météo de cet été 2025 sera de plus en plus fréquente dans les décennies qui viennent, selon les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec).

Selon le bilan climatique de Météo France, le déficit de pluie durant cet été a atteint 50 % dans la moitié sud de l'Hexagone et l'ensoleillement a été excédentaire de 10 %. Deux canicules ont frappé la France, l'une exceptionnelle par sa longueur et sa précocité du 19 juin au 4 juillet, l'autre du 8 au 18 août. Le seuil des 35 °C a été atteint sur plus de 80 % du territoire.

Toutes les appellations vinicoles de France subissent ces conditions exceptionnelles, mais les vins de Bordeaux en souffrent tout particulièrement. Le célèbre vignoble a connu un changement complet de conditions météo en moins d'un demi-siècle. Sur le site de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) de Villenave-d'Ornon en banlieue de Bordeaux, les chercheurs ont pu mesurer finement l'impact de ces variations météo. Ici, les ceps sont surveillés de près et les instruments de mesure objectivent les ressentis. *« Les baies de notre parcelle instrumentée ont été de 15 à 35 % plus petites »*, confirme ainsi Agnès Destrac-Irvine, ingénieure d'études à l'Inrae.

Un état de stress hydrique avec un mûrissement incomplet

Les chercheurs n'ont pas constaté de précocité ou de retard au moment du débourrement (éclosion des bourgeons) ou de la floraison, mais c'est à la véraison (quand la peau du raisin prend sa teinte sombre), au début du mois d'août, que tout s'est joué. Avec des sorts différents pour les deux cépages phares du Bordelais, le merlot et le cabernet sauvignon. *« Le merlot est précoce, aussi, début août, au moment de la canicule, il avait déjà effectué sa véraison, tandis que le cabernet sauvignon, plus tardif, était en plein mûrissement »*, poursuit Agnès Destrac-Irvine. Résultat : le changement de couleur se bloque, la vigne en stress hydrique devant en priorité préserver son eau. Mais le rayonnement solaire continue son travail et le raisin se charge en alcool. En pleine canicule, les chercheurs ont ainsi enregistré une température de 52,4 °C sur

MÉTHODES

La nécessaire adaptation des pratiques agricoles

Agroécologie, gestion de l'enherbement des rangs, méthodes de taille, enrichissement des sols ou apports azotés foliaires… autant de pratiques qui pourraient rendre les plantes plus résistantes aux sécheresses. *« Jusque dans les années 1980, le raisin avait du mal à mûrir dans le Bordelais, aussi les vignerons plantaient jusqu'à 10 000 pieds par hectare pour avoir une protection grâce à la densité de végétal, avec des raisins près du sol pour bénéficier de sa chaleur. Tout ce qu'il faut désormais éviter »*, regrette Marie-Laurence Porte. Aujourd'hui, la grande question est celle de l'irrigation. Elle est interdite pour les parcelles de plus de trois ans. Mais cette année, les appellations Lalande-de-Pomerol, Pomerol et Pessac-Léognan ont demandé — et obtenu — le droit d'irriguer.

Dans cette serre expérimentale, une chercheuse de l'Institut des sciences de la vigne et du vin mesure le poids hydrique des plantes.

LAHCÈNE ABIB / DIVERGENCE

des grappes proches du sol. Avec pour résultat des raisins mûrs mais dont les pépins et la peau n'ont pas atteint la maturité. Or, ce sont dans ces parties que se trouvent les anthocyanes, ces molécules qui donnent son caractère tannique au vin.

Ce mûrissement incomplet entraînera des conséquences dans le chai. Plus que jamais, le vin se fait dans la vigne. *« J'ai commencé ce métier en 2007 et à l'époque, la place de l'œnologue était à la cave, une fois la vendange rentrée,* se souvient Marie-Laurence Porte. *Aller goûter le raisin dans la vigne ne se faisait pas. Ce n'est plus du tout le cas.* » Trop chargés en alcool, les raisins ayant subi une température et un ensoleillement plus intenses rendent lors des différentes étapes de la fermentation des arômes de fruits cuits et de saveurs « compotées », qui effacent les subtilités et les originalités émanant des relations de la plante avec le terroir argilo-calcaire du Bordelais.

« Tout se joue avec les composés organiques volatils », révèle Alexandre Pons, œnologue et chercheur en œnologie à l'université de Bordeaux. Le vin en libère plus de 15 000. *« Le furanéol fournit des arômes de confiture de fraise, le massoia lactone des saveurs de figue, le nonalactone de compote de pêche, des caractéristiques données par des raisins trop chargés en alcool qu'on veut éviter »*, donne-t-il pour exemple.

Les bordeaux « glissent » vers les vins californiens

Les organisations viticoles des vins de bordeaux sont d'autant plus sensibles à ces évolutions qu'elles gomment ce goût qui fait le succès mondial de cette appellation. Depuis le début du XX^e^ siècle, les œnologues notent ainsi un « rapprochement sensoriel » : les bordeaux glissent vers les vins californiens de la Napa Valley.

Il faut donc chercher des solutions pour contrer ces effets sur la typicité du vin. La parcelle instrumentée de Villenave-d'Ornon est le cœur du programme Vit'Adapt. Ici, 52 cépages, 31 rouges et 21 blancs sont suivis depuis 2007, soit 2600 ceps étudiés à la loupe. On y trouve des variétés provenant d'Espagne, de Grèce, de Géorgie, de Bulgarie, qui pourraient être utilisées pour diminuer les degrés d'alcool des moûts sans pour autant modifier les équilibres de l'assemblage traditionnel du Bordelais entre merlot et cabernet sauvignon.

L'autre piste explorée est celle des porte-greffes. *« Il est possible de créer de nouvelles variétés plus résistantes à la sécheresse, mais c'est très long,* assure Élisa Marguerit, chercheuse en viticulture à Bordeaux Sciences Agro. *Aussi, nous avons décidé d'étudier plus précisément les qualités et défauts des porte-greffes actuels.* » Une expérimentation unique au monde : 275 combinaisons de porte-greffes et cépages. L'une d'elles permettra-t-elle au Bordelais de garder son originalité ? ■ **Loïc Chauveau**

SPL/BSIP - SPL/SUCRE SALÉ

Dotée d'une forme hélicoïdale et de flagelles — des filaments qui lui permettent de se déplacer —, la bactérie « Helicobacter pylori » se loge dans le mucus qui tapisse les parois de l'estomac.

Ulcères de l'estomac

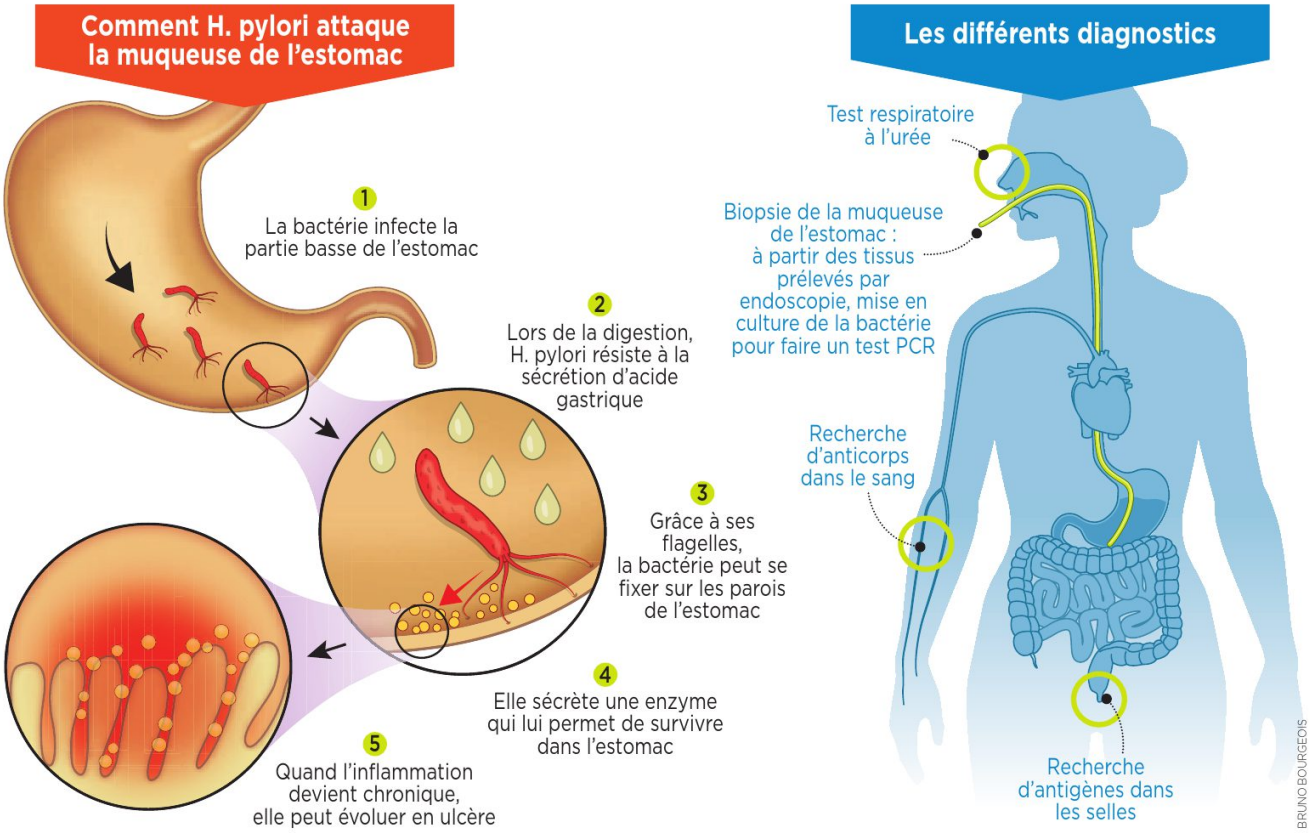
Le combat contre « Helicobacter pylori »

Présente dans l'estomac d'une personne sur deux dans le monde, et une sur cinq en France, cette bactérie est responsable de troubles gastriques, le plus souvent asymptomatiques, qui peuvent évoluer en ulcère ou en cancer. Si on sait aujourd'hui la diagnostiquer et l'éradiquer au moyen d'antibiotiques, reste le problème d'un dépistage plus généralisé dans la population.

Par Sylvie Riou-Milliot

Non, les ulcères de l'estomac ne sont pas tous liés au stress ou douloureux. Sept sur dix sont dus à *Helicobacter pylori*, une petite bactérie discrète, spiralée et mobile, les trois autres étant en lien avec une prise d'anti-inflammatoires non stéroïdiens ou d'aspirine. Exclusivement humaine, cette bactérie est présente dans l'estomac d'une personne sur deux dans le monde, une sur cinq en France, et sa responsabilité dans l'inflammation chronique de l'estomac ne fait plus débat.

Voilà tout juste vingt ans que la mise en évidence du rôle majeur joué par *H. pylori* dans la genèse des ulcères a été récompensée par un prix Nobel *(lire l'encadré p. 64)*. Cette découverte n'aurait jamais vu le jour si Barry Marshall, l'un des deux scientifiques récompensés, n'avait décidé de tester les effets de la bactérie sur son propre estomac. Pourquoi un tel geste ? Parce que dans les années 1980, *« personne, ni les gastro-entérologues, ni l'industrie pharmaceutique, ne voulait y croire »*, résume le Pr Francis Mégraud, bactériologiste au CHU de Bordeaux. Il aura fallu près d'un demi-siècle pour que la communauté scientifique finisse par admettre qu'un germe puisse survivre dans un environnement aussi acide que l'estomac. Aujourd'hui, *« on sait que la bactérie est responsable dans 80 % des*



cas d'une gastrite chronique qui reste souvent asymptomatique. Mais celle-ci peut évoluer en ulcère dans 15 à 20 % des cas, ou plus rarement — 1 % — en cancer », détaille le Dr Émilie Bessède, maîtresse de conférences et praticienne hospitalière (université et CHU de Bordeaux). *Helicobacter pylori* est d'ailleurs la première bactérie à avoir été reconnue directement cancérigène en 1994, onze ans avant le Nobel.

En 2025, on sait désormais la diagnostiquer par des moyens plus ou moins invasifs *(voir l'infographie ci-dessus)*, apprécier la sévérité des lésions qu'elle induit dans l'estomac par l'analyse dite anatomopathologique — examen à l'œil nu et au microscope — des biopsies réalisées pendant une fibroscopie, et aussi la traiter par au moins deux antibiotiques et un anti-acide — les fameux inhibiteurs de la pompe à protons (IPP) —, dont le traitement au long cours est rarement justifié *(lire l'encadré p. 65)*. Une révolution en tout cas pour tous les ulcéreux à qui on a suggéré pendant des dizaines d'années de réduire leur stress, de se mettre au yoga ou encore d'aller vivre à la campagne…

On sait également que l'interaction avec la bactérie coupable et nos estomacs commence *« le plus souvent dans l'enfance avant l'âge de 10 ans, par le biais d'une transmission dite interfamiliale orale,* précise Émilie Bessède, *c'est-à-dire par contact direct avec les liquides de l'estomac (régurgitations, vomissements). Des études ont démontré que le risque pour un enfant d'être contaminé est très élevé si ses deux parents sont positifs, moins si un seul parent est touché et encore moins si aucun des deux n'est infecté.* » Une fois installée dans la paroi de l'estomac qui l'hébergera la vie entière si on ne tente pas de l'en déloger, elle peut induire localement une inflammation de la muqueuse, plus ou moins agressive, évoluant très progressivement au fil du temps.

ÉMILIE BESSÈDE

« L'infection apparaît le plus souvent dans l'enfance, avant l'âge de 10 ans, par le biais d'une transmission intrafamiliale »

Émilie Bessède, maîtresse de conférences et praticienne hospitalière à l'université et au CHU de Bordeaux

Les préoccupations des médecins se focalisent aujourd'hui sur les solutions pour freiner l'antibiorésistance — elle a doublé en vingt ans —, optimiser les traitements disponibles tout en ne s'interdisant pas de rêver à un très hypothétique vaccin — pour lequel un seul essai clinique de phase 3 a été mené, mais c'était il y a plus de dix ans. Pour parvenir à faire disparaître la bactérie avec 90 % de succès, il faut utiliser plusieurs molécules. En France, on a souvent recours, sans étude préalable de la sensibilité de la souche aux antibiotiques, à une association fixe, soit… 12 gélules par jour (en quatre prises pendant 14 jours). *« Mais cette approche probabiliste reste empirique et est de plus en plus difficile à tenir face à la progression de l'antibiorésistance »*, indique le Dr Frédéric Heluwaert, gastro-entérologue à l'hôpital d'Annecy.

Des tests bactériologiques ultrasensibles sont disponibles

Car non seulement la bactérie résiste, mais les médecins et les patients ne sont pas toujours de bons élèves, les premiers ne vérifiant pas systématiquement en fin de traitement si celui-ci a été efficace, les seconds ne prenant pas forcément leur traitement jusqu'au bout en raison des nombreux effets secondaires. Publiée au printemps dernier dans la revue *Helicobacter*, une étude espagnole conduite auprès d'une centaine de gastro-entérologues a montré que seuls un tiers des praticiens respectaient les recommandations de suivi des traitements. Ils ne vérifiaient par exemple pas toujours leur efficacité par un test respiratoire à l'urée plusieurs semaines après l'arrêt du traitement *(lire l'encadré p. 66)*.

Heureusement, les pratiques sont en train de changer. Depuis environ deux ans, des tests bactériologiques d'amplification génique par PCR (polymerase chain reaction) ultrasensibles sont disponibles. Capables non seulement de détecter la présence de la bactérie, mais aussi d'identifier les mutations de résistance présentes au niveau de l'ADN bactérien, ils sont désormais remboursés et peuvent être réalisés directement par les gastro-entérologues au moment de la fibroscopie, pour l'analyse bactériologique de leurs biopsies. *« Ce qui permet de prédire si la souche sera sensible ou résistante à la clarithromycine* [principal antibiotique administré] *et nous donne enfin la possibilité de sortir de la démarche probabiliste pour une approche intelligente et personnalisée, permettant de choisir avec certitude un antibiotique qui sera efficace »*, précise Frédéric Heluwaert. Une démarche encouragée par le groupe d'Étude français des Helicobacter auprès des gastro-entérologues qui commencent progressivement à les utiliser.

Mais d'autres nouveautés sont attendues. De récents travaux insistent sur l'importance du contrôle de la sécrétion de l'acidité dans l'estomac pour l'efficacité du traitement, au-delà des antibiotiques. Aussi, de nouveaux anti-acides, plus efficaces que ceux actuellement disponibles, ont été développés au Japon où ils sont déjà commercialisés. Selon des résultats qui restent à confirmer sur d'autres populations, ils sont tellement puissants qu'ils permettraient même de se passer de la clarithromycine ! Face à ces progrès, pourrait-on dès lors envi-

PORTRAIT

Une bactérie discrète mais tenace

Petite (entre 2 et 3 micromètres), très solidement ancrée dans l'estomac grâce à la synthèse de molécules dédiées (adhésines), particulièrement mobile avec ses fins filaments… Autant d'atouts qui permettent à *H. pylori* de s'adapter et de proliférer dans un milieu pour le moins hostile car très acide. Elle est même capable de s'enrouler et de changer de forme pour mieux résister ! C'est d'abord avec la sécrétion d'une enzyme, l'uréase, qui neutralise son environnement immédiat que la bactérie survit au niveau du mucus, le film auto-protecteur produit en permanence par l'estomac pour protéger ses propres cellules de l'acide chlorhydrique et des enzymes de la digestion. Au fil du temps, l'inflammation chronique locale s'exprime de manière plus ou moins agressive selon les types de souches en jeu, la diversité génétique de la bactérie étant très riche. Tout peut donc se stabiliser au stade inflammatoire d'une gastrite mais aussi évoluer, au bout de plusieurs années, vers un ulcère ou un cancer. *« Différents facteurs de virulence sont aujourd'hui connus, les principaux étant les protéines VacA et CagA, mais toutes les souches ne possèdent pas l'îlot de pathogénicité CagA impliqué dans les processus de cancérisation »*, détaille le Dr Émilie Bessède, du CHU de Bordeaux.

Et la spécialiste de poursuivre : *« On a découvert récemment que la bactérie n'est pas la seule responsable et que le microbiote participe lui aussi activement à la cancérisation, mais selon des mécanismes inconnus qui restent à élucider. »*

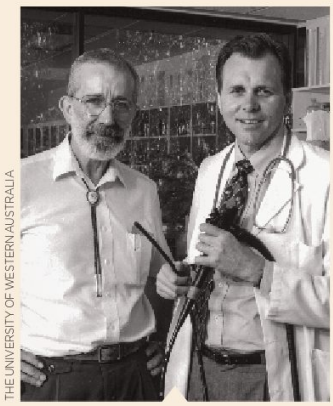
RECHERCHE

La folle histoire d'un Nobel

Pour prouver l'existence de la bactérie et sa responsabilité dans les ulcères, le médecin australien Barry Marshall n'hésita pas en 1984 à se l'administrer. Un geste récompensé vingt ans plus tard par un prix Nobel.

À quoi tient l'obtention d'un prix Nobel ? Celui attribué en 2005 au duo Robin Warren (1937-2024) et Barry Marshall (né en 1951) repose sur la longueur d'un week-end pascal, mais aussi sur la détermination d'un homme bien décidé à payer de sa personne en jouant au cobaye. Explications.

Quand les deux scientifiques se rencontrent au début des années 1980, Robin Warren nourrit déjà de forts soupçons à l'encontre d'*Helicobacter pylori,* mais il n'a pas réussi à la faire pousser en laboratoire. Il propose alors au jeune Barry Marshall de participer à ses recherches et tous deux vont pendant deux ans réussir à l'isoler chez de nombreux ulcéreux. Mais ils peinent à convaincre leurs pairs, fortement attachés au dogme du *« no acid no ulcer »* (*« pas d'acide, pas d'ulcère »*) en vogue depuis le début du XX^{e} siècle, et au fait qu'une bactérie ne peut survivre dans un milieu hautement acide. De plus, leurs tentatives de mise en culture des échantillons prélevés sur les patients sont infructueuses, *« les procédures consistant alors à abandonner les manipulations au bout de 48 heures si les colonies bactériennes n'apparaissaient pas »*, explique le Pr Francis Mégraud, ami de longue date des deux Nobel et professeur émérite de bactériologie au CHU de Bordeaux. Or, tout le monde l'ignore encore, mais le temps de croissance d'*H. pylori* est très lent.


THE UNIVERSITY OF WESTERN AUSTRALIA

Robin Warren et Barry Marshall, lauréats du Nobel de médecine en 2005, dans leur laboratoire à Perth (Australie).

Au printemps 1982, les portes du laboratoire australien de Perth vont exceptionnellement fermer pendant quatre jours, le temps du week-end pascal. Et c'est à leur retour le mardi matin que les deux scientifiques découvriront leurs boîtes de Petri enfin colonisées par ce qu'ils nommeront *Campylobacter pyloridis* — le nom actuel ne sera adopté qu'en 1989. Malgré cette étape importante, leurs travaux, toujours considérés comme peu orthodoxes, ne convaincront pas, et leur « abstract » sera même refusé par le congrès australien de gastro-entérologie à l'été 1983 ! C'en est trop. En juillet 1984, Barry Marshall décide de jouer au cobaye, ingurgite une préparation contenant un bouillon bactérien, un geste encadré par la réalisation d'une fibroscopie avant puis après cette auto-expérimentation. CQFD : dans les jours qui suivent, une gastrite aiguë (douleurs, nausées, vomissements) se développe. Le médecin n'attendra pas la formation d'un ulcère et se traitera rapidement… par antibiotiques. *« Mais personne n'y croira pendant encore presque vingt ans »*, signale Francis Mégraud. Personne, et surtout pas l'industrie pharmaceutique qui, forte de ses succès commerciaux avec les anti-acides amenés à être prescrits de nombreuses années chez un même patient, était très peu encline à les voir remplacer par une courte cure d'antibiotiques. Finalement, la première validation viendra des Instituts nationaux de santé des États-Unis, avant que la décision d'attribution du Nobel de médecine ne soit prise en 2005. ■

BURGER/PHANIE

La fibroscopie, ou endoscopie digestive, pratiquée sous anesthésie, permet d'effectuer un prélèvement de la paroi de l'estomac afin d'identifier la présence d'« H. pylori ».

sager de rechercher systématiquement *Helicobacter pylori* pour s'en débarrasser ? *« Non, pas en population générale,* insiste Frédéric Heluwaert. *Mais oui, chaque fois qu'est réalisée une endoscopie. Proposer un traitement ne sera possiblement bénéfique que chez 20 % des patients traités. En effet, dans 80 % des cas, il sera probablement inutile car la cohabitation se serait déroulée toute la vie sans aucune complication. Mais nous n'avons pas à ce jour de moyen fiable pour prédire qui fera les complications ou non. »*

En pratique, les décisions se prennent au cas par cas, selon l'âge de la personne au moment de la découverte de l'infection, de l'éventuelle présence de symptômes, d'antécédents familiaux de cancers de l'estomac… Or dès 2019, la Haute Autorité de santé alertait déjà à propos d'*« écarts mis en évidence entre les enquêtes de pratique et les recommandations officielles »* : traitements antibiotiques souvent prescrits à l'aveugle et pas toujours aux doses efficaces nécessaires, trop peu de contrôle de leur efficacité par le test respiratoire, etc. *« Chaque année, environ 150 000 nouveaux patients sont diagnostiqués positifs à* Helicobacter *en France et mis sous antibiothérapie, et nous voulons savoir qui fait quoi, comprendre comment se coordonne la prise en charge entre médecins généralistes et gastro-entérologues »*, indique Frédéric Heluwaert.

Une étude en France pour améliorer la prise en charge

C'est dans ce but qu'il coordonne l'étude Helite, première base de données hexagonale qui va rassembler différentes informations : les circonstances de diagnostic, les types de traitements prescrits avec ou sans étude de la sensibilité aux antibiotiques, sans oublier le suivi de leur efficacité et l'observance des patients… Déjà 1500 dossiers, tous issus de la région Savoie, point de départ de l'étude, ont été inclus mais le travail doit s'étendre à l'ensemble du territoire. Il permettra à terme de présenter des recommandations pour améliorer la prise en charge. Il demeurera cependant impossible de proposer des règles universelles valables partout sur la planète. *« Il existe d'importantes disparités géographiques de prévalence de l'infection (70 % en Asie et en Afrique, 40 % en Europe de l'Est, 15 % en France),* précise Frédéric Heluwaert. *Par ailleurs, le taux de résistance à l'un des antibiotiques, la clarithromycine, varie de 30 % en Italie à 20 % en France,*

THÉRAPEUTIQUE

Attention aux médicaments contre l'acidité

IPP : trois lettres qui désignent les inhibiteurs de la pompe à protons, ces molécules efficaces et bien tolérées utilisées pour réduire la sécrétion acide de l'estomac. Indiqués dans la prise en charge du reflux gastro-œsophagien et des ulcères gastro-duodénaux, ils sont massivement prescrits : plus de 16 millions de Français (25 % de la population !) en ont déjà pris. En 2020 et en 2022, la Haute Autorité de santé (HAS) a sonné l'alarme, estimant que plus de la moitié de ces usages n'étaient pas justifiés. Ils sont en effet souvent prescrits systématiquement ou sur des durées trop longues, et renouvelés pendant des années sans réévaluation de leur balance bénéfice-risque. Pourtant, selon des études récentes, leur prise chronique est associée à des effets délétères comme le risque de démence ou une moindre efficacité des chimiothérapies.

ou 5 % au Danemark. » De plus, les souches bactériennes ne sont pas toutes identiques, ni responsables partout des mêmes pathologies, certaines étant plus agressives que d'autres. Et si la bactérie est présente dans un estomac sur deux à l'échelle mondiale, le risque qu'elle provoque un cancer reste heureusement faible (1 %). En France, c'est environ 6000 nouveaux cas par an. Mais là encore, plusieurs facteurs entrent en jeu : le type de souche, mais aussi le profil du patient, c'est-à-dire *« ses facteurs génétiques, environnementaux (exposition au tabac) et alimentaires (alimentation trop salée, riche en viande rouge), tous se combinant entre eux dans l'apparition et la progression de la maladie »*, détaille Émilie Bessède. Pourtant, avec un traitement antibiotique bien prescrit et bien suivi, on peut éviter l'apparition de ce cancer en faisant disparaître la bactérie.

Coupler le dépistage du cancer de l'estomac à celui du côlon

Par chance, il n'y a jamais d'urgence à traiter car les dégâts au niveau des cellules de l'estomac ne surviennent qu'après plusieurs décennies, *« selon une spirale qui passe par différents stades qu'il est possible d'enrayer à condition d'agir au bon moment, avant un point dit de non-retour, celui de l'apparition de lésions précancéreuses, soit en moyenne vers 50 ans,* détaille Frédéric Heluwaert. *Au-delà de cette limite, traiter la bactérie reste nécessaire, mais la spirale étant lancée et ne pouvant plus être interrompue, une surveillance par endoscopie pourra être nécessaire.* » Reste bien sûr le dépistage.

DIAGNOSTIC

Détecter l'infection par le souffle

Ce test respiratoire repose sur la capacité de la bactérie à sécréter une enzyme, l'uréase, qui détruit l'urée. Le patient boit une solution contenant de l'urée marquée au carbone 13 qui sera détruite par l'enzyme si la bactérie est présente. Le test par analyse du souffle est alors dit positif. Son intérêt est double. Il détecte la présence de la bactérie et peut aussi évaluer l'efficacité d'un traitement s'il est réalisé un mois après son arrêt. Devenu alors négatif, il prouve que la bactérie a disparu.

GARO/PHANIE

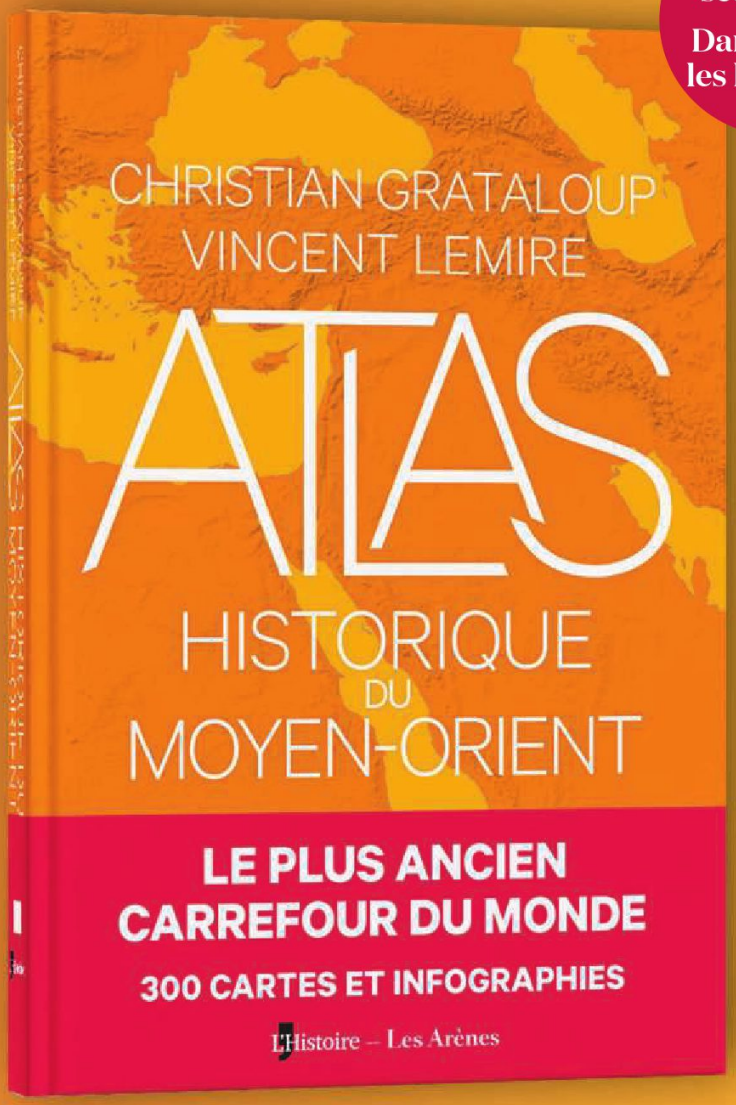
Le patient boit un liquide contenant du carbone 13. Si « H. pylori » est présente, le gaz carbonique expiré sera marqué par le ^{13}C.

Comme l'a démontré une solide étude épidémiologique parue l'été dernier dans la revue *Nature*, menée par le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) de Lyon, si aucune mesure n'est mise en place pour les années à venir, d'ici à 2050 plus de 10 millions de cas de cancers de l'estomac surviendront dans le monde chez des personnes nées entre 2008 et 2017 — dont la très grande majorité se produira en Afrique —, avec 44 000 cas rien que pour la France. Aussi, les auteurs plaident d'ores et déjà en faveur de la mise en place de stratégies dites *« screen and treat »* : un dépistage précoce pour rechercher la bactérie, une fibroscopie gastrique et un traitement avant que la spirale ne s'emballe. Si ces programmes étaient généralisés, 75 % des cas de cancers pourraient être évités. Or, à ce jour, seuls certains États d'Asie (Japon, Corée du Sud, Taïwan), c'est-à-dire des lieux cumulant prévalence élevée de l'infection, souches virulentes mais aussi solidité des systèmes de santé, ont su opter avec succès pour ces programmes de dépistage.

En Europe aussi, les choses commencent à bouger. Les meilleures façons de dépister et de traiter étaient à l'ordre du jour du 38e colloque du Groupe d'étude européen sur Helicobacter et le microbiote (EHMSG) qui s'est tenu à Rome en septembre. Le groupe de réflexion Togas (Towards gastric cancer screening implementation in the European Union) y a présenté les résultats d'expériences pilotes en Lettonie, Slovénie, Pologne et Allemagne pour inciter la population et les personnels de santé à se faire dépister. Une autre piste serait aussi de coupler le dépistage du cancer du côlon à celui de l'estomac, mais reste à trouver le moment idéal, vers 50 ans ou même encore plus tôt, vers 45 ans. Se débarrasser à 100 % d'*H. pylori* ne sera pas facile : comme l'ont montré des chercheurs de l'institut Max-Planck (Allemagne), elle est présente depuis au moins 100 000 ans dans l'estomac des humains. ■

Si aucune mesure n'est mise en place pour les années à venir, d'ici à 2050 plus de 10 millions de cas de cancers de l'estomac surviendront dans le monde chez des personnes nées entre 2008 et 2017

25 €
seulement
—
Dans toutes
les librairies

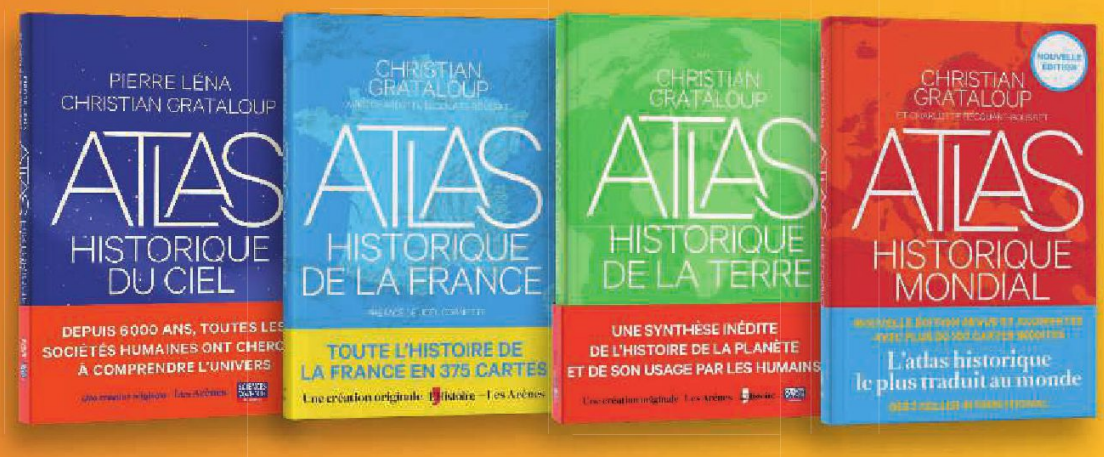


Le monde à la lumière de l'Histoire

« Une mine d'or pour les étudiants et les enseignants. Superbe. »
Le Devoir

« Un livre indispensable pour comprendre notre Histoire. »
France Culture

Les atlas de référence de Christian Grataloup en coédition avec *L'Histoire*



L'Histoire | Les Arènes

L'appétit a un interrupteur cérébral

Une structure cérébrale déclenche ou stoppe notre appétit, au point de rendre irrésistibles le goût amer ou des objets non comestibles… Cette découverte ouvre une nouvelle voie de recherche dans la neurobiologie de l'appétit, voire dans le traitement des troubles alimentaires.

Connaissez-vous le BNST ? Le « bed nucleus of the stria-terminalis », ou les noyaux du lit de la strie terminale en bon français ? Car cette structure cérébrale située juste devant l'hypothalamus, dans la région la plus profonde du cerveau, vient d'acquérir une célébrité toute nouvelle dans le monde de la neurobiologie, après qu'une équipe de l'université Columbia, à New York (États-Unis), lui a consacré un article dans la revue *Cell*. Sa lecture transforme la compréhension des mécanismes de l'appétit et ouvre de nouvelles pistes de recherche pour mieux traiter les troubles alimentaires. On y découvre que le BNST contrôle l'appétit, en combinant les signaux internes et externes *(lire l'encadré ci-contre)*. *« Ces travaux apportent quelque chose de très nouveau, en décrivant un nouvel acteur capable d'allumer ou d'éteindre la consommation »*, acquiesce Moïse Coëffier, qui dirige une unité de recherche Inserm sur l'axe microbiote-intestin-cerveau au sein de l'université de Rouen Normandie.

Les chercheurs américains montrent, chez la souris, que ces neurones répondent à l'ingestion de produits au goût sucré en activant la consommation alimentaire. Ils répondent même aux édulcorants, ces « faux sucres » sans apport calorique. *« Nous observons des réponses fortes non seulement pour le sucré, mais aussi pour les graisses et le sel. Le BNST réagira certainement à l'umami »*, précise Jose Canovas Schalchli, chercheur à l'université Columbia et premier auteur des travaux. La structure cérébrale reçoit les signaux gustatifs et y répond.

Une population de neurones réagit aussi à l'amertume, cette fois pour supprimer la consommation. *« Ces récepteurs de l'amertume sont probablement responsables de l'inhibition de l'alimen-*

GETTY IMAGES

tation lorsque le BNST reçoit des signaux de goût amer », poursuit le biologiste. L'amertume est une saveur répulsive pour les mammifères, fréquemment considérée comme un risque d'exposition à des substances toxiques. *« Le BNST intègre à la fois les signaux favorisant la consommation et ceux qui la suppriment afin de la réguler* », résume Jose Canovas Schalchli. *« Jusqu'à présent, on ne considérait que l'hypothalamus et son noyau arqué pour recevoir les informations de la périphérie. Ces travaux proposent un nouvel intégrateur* », complète Moïse Coëffier.

Pour tester cette hypothèse, les scientifiques de Columbia ont complètement piraté le comportement de souris. En activant le BNST — à l'aide de techniques génétiques de pointe qui permettent d'allumer ou d'éteindre des neurones spécifiques avec un faisceau lumineux qu'on passe sur la tête des souris —, ils font boire d'importantes quantités d'eau aux rongeurs qui n'ont pas soif et rendent attractifs l'amertume ou des produits non comestibles, comme des boulettes de polystyrène. *« Apparemment, quand on active ces neurones, on ne contrôle plus rien. Cela ressemble aux comportements compulsifs qu'on connaît bien chez certains patients* », évoque Moïse Coëffier. Mais il manque encore des éléments pour établir ce parallèle.

Les chercheurs avancent que leur découverte pourrait avoir des répercussions cliniques, pour restaurer l'appétit quand celui-ci est détérioré, ou aider à le réduire

Les chercheurs américains avancent quant à eux que leur découverte pourrait avoir des répercussions cliniques, pour restaurer l'appétit quand celui-ci est détérioré, comme avec certains traitements anticancer, ou pour aider à le réduire, par exemple chez les gens souffrant de troubles métaboliques. En guise de démonstration, ils ont stimulé le BNST chez des souris auxquelles on a administré de la cisplatine, une chimiothérapie connue pour couper l'appétit. Résultat : elles perdaient moins de poids que sans la stimulation. À l'inverse, en bloquant l'activité de ces noyaux cérébraux chez des souris obèses, les animaux perdaient du poids, dans une proportion comparable à celle observée avec les fameux nouveaux médicaments injectables contre le diabète — les sémaglutides, ou analogues du GLP-1 (*lire* Sciences et Avenir *n° 931, septembre 2024*). *« Ils n'activent pas seulement les neurones impliqués, mais tout le BNST ! Ces expériences sont beaucoup moins précises que le reste de l'article* », tempère Adélie Salin, neurobiologiste à l'université de Rennes.

Une structure associée à des pathologies psychiatriques

Reste que les techniques utilisées chez la souris ne sont pas directement transposables à l'humain, car elles impliquent des manipulations génétiques. *« Pour obtenir ces effets en clinique, il faudra des médicaments ! Ce ne sera pas simple… »*, conclut la spécialiste, en raison des difficultés de la pharmacologie à cibler des structures cérébrales.

Mais ces découvertes pourraient avoir aussi des répercussions au-delà des traitements : *« Est-ce que le stress et les émotions peuvent aussi modifier cette réponse ? Ce serait intéressant… »*, souffle Moïse Coëffier. D'autant que de précédentes recherches ont associé le BNST à des pathologies psychiatriques comme l'anxiété, les troubles post-traumatiques ou l'anorexie, dans lesquelles la dérégulation de l'appétit est connue. ■

Agnès Vernet

SIGNAUX

Faim ou appétit ?

La faim est un signal strictement lié à nos besoins biologiques : besoins énergétiques, glycémie, remplissage de l'estomac. L'appétit, lui, rassemble des signaux internes et externes : les sens, bien sûr — une odeur, un goût sucré, un mélange de textures peuvent rendre un plat irrésistible —, mais aussi le stress, l'humeur ou le contexte du repas.

« Ces signaux internes et externes régulent la motivation à aller chercher à manger dans l'environnement, et donc la consommation », explique Adélie Salin, neurobiologiste à l'université de Rennes. Au carrefour des besoins vitaux et des envies, la neurobiologie de l'appétit est un domaine de recherche en plein essor. *« Les signaux cérébraux de la consommation alimentaire sont beaucoup moins bien connus que ceux de la drogue,* souligne Adélie Salin. *Les chercheurs s'y sont longtemps moins intéressés. Il faut dire que les comportements alimentaires sont très compliqués, comme un puzzle à 10 000 pièces, alors que celui des comportements addictifs n'aurait que 1000 pièces… »*

Ralentir la neurodégénérescence grâce à la lumière

Une technique, la photobiomodulation, fait l'objet d'essais dans le traitement des maladies de Parkinson et d'Alzheimer. Les premiers résultats, encourageants, montrent que cette approche permet de stimuler les neurones par le proche infrarouge afin de les protéger.

Si la recherche contre la maladie de Parkinson avance rapidement, grâce à de nouveaux traitements qui améliorent la qualité de vie des patients, ils s'attaquent seulement aux symptômes sans véritablement ralentir la neurodégénérescence à l'origine de la maladie. *« Trouver un traitement qui protège réellement les neurones est le graal des neurosciences »*, lance le professeur John Mitrofanis, spécialiste des maladies neurodégénératives à Clinatec (Grenoble) et à l'université de Sydney (Australie). Or, avec son équipe, ce chercheur australien pourrait justement avoir trouvé ce graal. Un traitement qui promet d'augmenter la survie des neurones et de ralentir la progression de la maladie : la lumière.

La maladie de Parkinson est caractérisée par un déficit de dopamine, causé par la perte progressive des cellules qui produisent ce neurotransmetteur, les neurones dopaminergiques. Or, les lumières rouge et proche infrarouge parviennent à stimuler le métabolisme de ces neurones, les protégeant de la neurodégénérescence. *« Grâce à la lumière, ils survivent plus longtemps, autant chez la souris malade que chez des primates non humains,* résume John Mitrofanis. *Chez ces derniers, qui ont des signes cliniques très similaires à ceux observés chez l'humain atteint de Parkinson, nous observons également une amélioration des symptômes. »* Ces études précliniques, publiées entre 2014 et 2017, ont ouvert la voie au premier essai clinique chez l'humain, encore en cours.

Les bienfaits de la lumière théorisés depuis les années 1960

Pourtant, cette technique novatrice… n'est en réalité pas si neuve. Les bienfaits de la lumière sont théorisés depuis l'Égypte ancienne, mais ce n'est que dans les années 1960 qu'a été trouvée une façon de l'utiliser de manière focalisée pour soigner une partie du corps. Le pionnier est Endre Mester, chirurgien hongrois qui utilisa pour la première fois un laser de basse intensité pour réduire l'inflammation de la peau. Depuis, cette méthode, connue comme photobiomodulation, est employée notamment par des physiothérapeutes et dans des médecines alternatives. Mais ce n'est que depuis une dizaine d'années que des preuves scientifiques ont validé son bien-fondé, créant un intérêt dans le monde de la recherche en neurosciences. *« La lumière du soleil est composée de plusieurs longueurs d'onde qui varient durant la journée : le matin, la lumière bleue est majoritaire, et cela nous aide à nous réveiller et à nous focaliser ; le soir, le rouge et l'infrarouge prennent le dessus et sont censés aider notre corps à se réparer,* explique John Mitrofanis. *Nous appliquons au cerveau cette dernière partie du spectre lumineux. »*

Mais pourquoi cette lumière est-elle bénéfique pour le corps ? Des études récentes montrent que la lumière proche de l'infrarouge agit directement sur les

Le casque modulaire conçu par Regenlife, équipé de diodes, diffuse de la lumière afin de réduire l'inflammation neuronale caractéristique de la maladie d'Alzheimer, ou de soigner les symptômes des commotions cérébrales. ◀

ALAIN JOCARD / AFP

usines énergétiques des cellules, les mitochondries, en augmentant leur production d'énergie *(lire l'encadré p. 73)*. *« Il y a probablement aussi une action anti-inflammatoire et une modification de l'expression de certains gènes qui interviennent dans les processus de ralentissement du vieillissement cellulaire »*, ajoute Stephan Chabardès, chef du service neurochirurgie au CHU Grenoble Alpes et responsable du secteur hospitalier de Clinatec. Avec son équipe, il cherche à savoir si ces effets sur la cellule permettent de protéger les neurones dopaminergiques, responsables de la sécrétion de dopamine dans la substance noire (structure à la base du cerveau qui participe au contrôle de la motricité), et qui succombent petit à petit dans la maladie de Parkinson.

STEPHAN CHABARDÈS

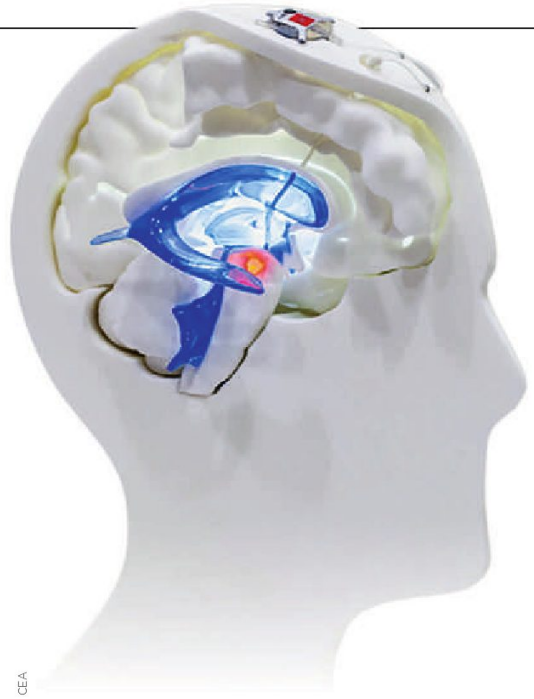
« Seule la photobiomodulation pourrait retarder la progression de la maladie, ce que les autres traitements ne permettent pas »

Stephan Chabardès, chef du service neurochirurgie au CHU Grenoble Alpes et responsable du secteur hospitalier de Clinatec

Dans l'expérience, la lumière est émise directement à l'intérieur du cerveau, grâce à un dispositif implantable similaire à celui utilisé pour la stimulation cérébrale profonde (qui sert à traiter les symptômes de la maladie de Parkinson avec de l'électricité). Elle est délivrée à l'intérieur de la boîte crânienne à travers une fibre optique, dans des longueurs d'onde allant de 600 à 1300 nanomètres, afin de stimuler les neurones.

Cet essai clinique de phase 1 (dite de sécurité car le but principal est de montrer que la technique est sûre) compte 14 patients, diagnostiqués il y a moins de deux ans. Sept ont reçu la sonde lumineuse et sept une sonde factice pour quatre ans. Le dernier patient a été opéré en octobre dernier. En janvier 2025, Stephan Chabardès a présenté dans un pré- ▶

print (des travaux qui n'ont pas encore été validés par les pairs) les résultats préliminaires sur deux ans de traitement pour les trois premiers patients inclus dans l'étude, avec des résultats très encourageants. *« L'implantation de cette sonde se passe bien et l'illumination infrarouge en continu est bien tolérée, il n'y a pas d'effets secondaires graves »*, résume le chercheur. Les capacités motrices des patients, évaluées tous les six mois, montraient une légère amélioration alors que les patients non traités présentaient une forte dégradation. Cette diminution des symptômes était observée aussi dans leur démarche, qui ne ralentissait pas comme chez les patients non traités.


CEA

Le dispositif de Clinatec est composé d'un boîtier optique implanté au niveau du crâne et d'une fibre optique qui transporte la lumière infrarouge au niveau des neurones dopaminergiques.

Intervenir au début de la maladie

Des analyses d'imagerie cérébrale ont révélé que les cerveaux des patients traités produisaient davantage de dopamine un an après le début du traitement, montrant que la lumière stimulait bien les neurones dopaminergiques, ce qui expliquerait l'atténuation des symptômes. *« On a l'impression que leur maladie évolue moins vite,* s'enthousiasme Stephan Chabardès, tout en restant prudent : *attendons les résultats à deux ans de tous les malades et espérons qu'ils confirmeront ces premières observations.* » Si c'est le cas, la prochaine étape sera de faire une étude avec un plus grand nombre de patients, dans le but de les traiter dans les étapes précoces de la maladie de Parkinson. Cependant, même si son efficacité est confirmée, il ne s'agira pas pour autant d'un traitement miracle : *« On ne va pas guérir la maladie ; les patients auront toujours besoin de médicaments, peut-être même de la stimulation cérébrale profonde,* précise-t-il. *Ce qu'on essaie, c'est de faire en sorte d'améliorer l'évolution de la maladie en ralentissant le processus de dégénérescence.* »

Le bémol, c'est que pour être efficace, cette technique devra être appliquée au début de la maladie. Puisque le but est de protéger les neurones dopaminergiques, il faudra intervenir au moment où il y a encore un bon nombre de ces cellules dans la substance noire, avant qu'elles ne soient emportées par la neurodégénérescence. Le patient devra ainsi prendre la décision de subir une chirurgie invasive du cerveau (pour implanter la sonde), avec les risques que cela peut comporter, à un moment de la maladie où les symptômes ne sont pas encore très prononcés et où les traitements traditionnels sont encore efficaces pour les atténuer. *« Oui, c'est une approche invasive, mais les risques sont mesurés,* rassure Stephan Chabardès. *Et il faut insister sur le fait que seule la photobiomodulation pourrait retarder la progression de la maladie, ce que les autres traitements ne permettent pas.* » Sa conclusion : le rapport risque-bénéfice serait largement favorable.

Ce rapport serait meilleur encore pour d'autres utilisations possibles de cette technologie. C'est notamment le cas de la maladie d'Alzheimer : les parties du cerveau affectées étant bien plus proches de la surface — principalement au niveau du cortex —, elles peuvent être stimulées de manière non invasive. Pour ce faire, la start-up montpelliéraine Regenlife a conçu un dispositif qui lui a valu une nomination au prix Galien USA 2025 : un casque modulaire

BIOLOGIE

La lumière à l'origine de la vie ?

Pourquoi des cellules enfouies dans l'obscurité du cerveau sont-elles encore sensibles à la lumière ? Pour l'expliquer, John Mitrofanis, spécialiste des maladies neurodégénératives à Clinatec (Grenoble), avance deux hypothèses. D'abord, il s'agirait d'un vestige de nos ancêtres unicellulaires, chez qui la lumière du soleil aurait joué un rôle important. En devenant de plus en plus complexes, les organismes auraient simplement gardé cette capacité, même dans les cellules désormais cachées de la lumière. Mais il se pourrait aussi que les cellules aient retenu ce lien avec la lumière volontairement : *« Les cellules ne font pas que recevoir, elles émettent aussi de la lumière sous la forme de biophotons*, révèle-t-il. *Et cette émission change en fonction de l'état de la cellule. »* Il se pourrait donc qu'elles s'en servent aussi comme système de communication cellulaire, pour dire aux voisines si elles vont bien ou pas. Une possibilité actuellement à l'étude.

qui s'ajuste à la morphologie crânienne de chacun… et à sa chevelure : *« Les cheveux reflètent beaucoup de lumière, peu d'ondes lumineuses sont à même de les traverser,* explique Guillaume Blivet, fondateur de la start-up. *Les composants optiques de notre casque sont reliés à un guide qui va traverser les cheveux comme un peigne pour se poser directement sur le cuir chevelu.* »

La technique pourrait être utilisée pour les infarctus

L'entreprise a une autre cible : le microbiote intestinal, afin d'agir sur l'ensemble de l'axe cerveau-intestin grâce à une ceinture abdominale. *« L'existence d'une communication bidirectionnelle entre le cerveau et l'intestin est de plus en plus documentée, notamment pour les maladies neurodégénératives,* rappelle-t-il. *Nous avons mis en évidence que la photobiomodulation donne de meilleurs résultats quand elle est appliquée en double* [cerveau-intestin] *plutôt qu'avec une simple application sur le cerveau.* »
Le dispositif est à l'étude dans un essai clinique de phase 3 en collaboration avec le CHU de Toulouse et l'Assistance publique-hôpitaux de Paris (AP-HP). Une centaine de patients y sont traités durant six mois, avec un suivi de la même durée après l'arrêt du traitement. L'essai devrait rendre ses conclusions dans un an, et, si les résultats sont positifs, Guillaume Blivet espère une mise sur le marché fin 2027.
En dehors des maladies de Parkinson et d'Alzheimer, la photobiomodulation pourrait être utilisée pour un très grand nombre de pathologies. En effet, les mitochondries qu'elle stimule sont présentes dans toutes les cellules du corps ! Elle est ainsi expérimentée pour traiter la maladie à corps de Lewy (maladie neurodégénérative qui cause des troubles cognitifs et des hallucinations), les traumatismes crâniens, les troubles du sommeil et les infarctus. *« Nous avons développé un dispositif en forme de gilet, qui peut être utilisé le plus tôt possible après un infarctus du myocarde dans le but de limiter la propagation de la mort des cardiomyocytes et ainsi éviter l'évolution vers l'insuffisance cardiaque, fréquente chez les patients* », affirme Laurent Hérault, directeur du fonds de dotation Clinatec, où cette étude est menée.
Le traitement par la lumière serait-il en passe de bousculer la médecine durablement ? *« Cette technologie a énormément d'avantages : elle a un coût accessible et elle peut être déployée à grande échelle* », martèle Guillaume Blivet. Néanmoins, le chemin est long car, dans les esprits, elle reste associée aux médecines alternatives. *« Je n'y ai pas cru la première fois que j'en ai entendu parler, il y a une vingtaine d'années,* avoue John Mitrofanis. *Il a fallu que je le voie de mes propres yeux, expérimentalement. Je pense que les gens commencent à accepter le bien-fondé de cette approche, mais une grande partie de la communauté médicale ne croit pas encore que la lumière puisse avoir une influence sur la fonction cellulaire, au moins au point d'être thérapeutique.* » Ces essais cliniques pourraient les éclairer. ■ **Nicolas Gutierrez C.**

MÉTABOLISME CELLULAIRE

Illuminer les mitochondries pour protéger la cellule

Au sein des mitochondries, l'énergie est produite dans la chaîne respiratoire : un ensemble de complexes protéiques utilise l'oxygène pour produire de l'ATP, la molécule énergétique des cellules. La lumière proche de l'infrarouge a un effet direct sur ce processus, car elle est captée par une de ses protéines clés, l'oxydase de cytochrome c. Cela stimule son fonctionnement, augmentant le rendement de la chaîne respiratoire, et donc la production d'ATP. Cette optimisation mitochondriale a aussi comme conséquence une diminution du stress oxydatif, produit en excès lorsque cette organelle est dysfonctionnelle. Ainsi, la lumière a un effet double très rapide : les cellules ont plus d'énergie et elles sont protégées du stress. *« Les mitochondries sont essentielles pour la cellule, car elles produisent l'énergie utilisée dans une grande partie des processus cellulaires,* rappelle John Mitrofanis, spécialiste des maladies neurodégénératives à Clinatec (Grenoble). *Quand la mitochondrie va mal, la cellule va mal… et inversement, quand la mitochondrie fonctionne bien, la cellule aussi se porte mieux.* »
Et ces bénéfices ne s'arrêtent pas à la mitochondrie, car celle-ci communique constamment avec le noyau cellulaire, où réside le génome. Grâce à cette amélioration de la fonction mitochondriale, les signaux envoyés au noyau changent aussi, activant l'expression d'une vingtaine de gènes qui stimulent la cellule et la protègent. Cette modification de la transcription génétique a des effets sur le long terme, qui sont visibles des semaines, voire des mois après la stimulation lumineuse. *« On a donc des effets à court et à long termes qui améliorent la survie cellulaire, surtout lorsque les cellules sont sous un stress,* résume le chercheur. *C'est extrêmement efficace, et, en théorie, cela pourrait fonctionner avec tout type de cellule.* »

Cocktail de fruits exotiques

Cette catégorie de fruits cumule les avantages nutritionnels. Particulièrement généreux en fibres, vitamines et antioxydants, certains auraient des effets neuroprotecteurs et anti-inflammatoires.

Ananas, kaki, grenade, mangue… Les fruits exotiques ensoleillent tout l'hiver les étals de leurs couleurs flamboyantes. Mais aujourd'hui, réchauffement climatique oblige, il n'est plus forcément nécessaire de les faire venir de l'autre bout du monde pour les déguster. En Provence ou dans les Pyrénées-Orientales, certains agriculteurs parviennent à acclimater la mangue ou les fruits de la passion, par exemple. Pour bien les sélectionner, sachez que la goyave se choisira avec une peau lisse quand celle des fruits de la passion devra être plissée, et qu'il vaut mieux préférer les litchis et les grenades lourdes. Pensez aussi à conserver à température ambiante les fruits exotiques dits **climactériques** (mangue, papaye, etc.) afin de les laisser poursuivre leur maturation.

Ils sont riches en antioxydants

Pendant la maturation de la papaye, la couleur de la pulpe passe du blanc au rouge ou jaune en raison de l'apparition de caroténoïdes (1) (bêta-carotène, violaxanthine, xéaxanthine, etc.), également à l'origine de la couleur jaune orangé de la chair de l'ananas, des fruits de la passion et de la mangue. Les fruits tropicaux renferment aussi des polyphénols (acide gallique, quercétine…), des acides phénoliques (acide chlorogénique, acide vanilline…) et, pour l'ananas, de la myricétine, un flavonol dont la consommation quotidienne serait liée à une diminution du risque de diabète de type 2 (2). La couleur

29 032 tonnes d'ananas ont été cultivées en France (Guyane, Martinique, Guadeloupe, La Réunion et Mayotte) pour une production mondiale d'environ 29 millions de tonnes en 2022. (SOURCE: AGRESTE.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

CLIMACTÉRIQUE Se dit d'un fruit qui continue de mûrir après la récolte, grâce à sa propre production d'éthylène. Parmi eux, la papaye et la mangue. *A contrario*, les fruits non climactériques (grenade, litchi...) ne mûrissent plus une fois cueillis.

ANTHOCYANES Pigments naturels rouges, violets ou bleus présents dans les fruits. Ils présentent des propriétés antioxydantes et des effets bénéfiques pour le système cardio-vasculaire.

ANTIOXYDANTS Composés produits par les végétaux pour se protéger des agressions environnementales. Ils sont capables, lorsque nous les assimilons, de neutraliser les radicaux libres.

rouge de la grenade est, elle, liée à la présence d'**anthocyanes** et de tanins (punicalagines, ellagitanins, acides ellagiques) qui lui confèrent ses propriétés **antioxydantes** et anti-inflammatoires.

Une source de vitamines et de minéraux

L'ananas, la mangue, les fruits de la passion et la papaye renferment de belles teneurs en vitamine C. Consommer 50 g de goyave suffit ainsi à fournir l'ensemble des besoins quotidiens. Les fruits de la passion, la papaye, la mangue et la goyave sont particulièrement riches en vitamine B9, qui prévient chez la femme enceinte les risques de malformations du tube neural (futur système nerveux) du fœtus. La mangue est la plus riche en vitamine E, antioxydante, bonne pour l'immunité et la protection de la peau.

La grenade, les fruits de la passion, la papaye, le kaki, la goyave et la noix de coco sont aussi intéressants pour leurs apports en potassium, impliqué dans la régulation de la pression artérielle et l'équilibre hydrique de l'organisme.

Ils renferment des fibres

Les fruits exotiques sont sucrés (7,7 g/100 g pour la papaye à 15,7 g/100 g pour le litchi). Il s'agit principalement de saccharose pour la mangue, l'ananas et les fruits de la passion, de fructose et de glucose pour la grenade, le kaki et le litchi. Certains fruits exotiques contribuent aussi à l'apport journalier recommandé de fibres (30 g par jour) avec 9 g pour 100 g de noix de coco, 5,15 g/100 g de goyave. La noix de coco est la plus calorique (358 kcal/100 g) en raison de sa teneur en lipides (33 %), principalement des acides gras saturés (29 %) (3). La pulpe du fruit de la passion contient aussi jusqu'à un quart de graines comestibles, riches en acide linoléique (65 %), un acide gras poly-insaturé de type oméga-6.

VANESSA BEDJAÏ-HADDAD
Diététicienne-nutritionniste à Paris

L'eau de coco, utile après le sport

« L'eau de coco est une boisson naturelle très hydratante. Grâce à sa richesse en électrolytes tels que le sodium, le magnésium et le potassium (200 mg/100 ml), elle est intéressante ponctuellement après le sport et en cas de fortes chaleurs. C'est une alternative légère aux jus de fruits classiques, mais qui ne peut bien évidemment pas se substituer à l'eau plate, car elle reste sucrée (2,5 g/100 ml), même sans sucres ajoutés. Cependant, son contenu en vitamines et antioxydants reste limité comparé aux fruits exotiques eux-mêmes ou à leurs jus. »

Sous la protection de la grenade

Boire 150 ml de jus de grenade par jour pendant deux semaines entraînerait une baisse significative de la pression artérielle chez les personnes hypertendues. Les effets neuroprotecteurs de la grenade seraient efficaces dans la réduction des facteurs de risque de développement de la maladie d'Alzheimer (4). Des travaux *in vitro* et *in vivo* suggèrent également des propriétés anti-inflammatoires, antiprolifératives, et même antitumorigènes (5). Toutefois, à ce stade, il n'existe pas suffisamment de preuves pour affirmer que la grenade peut aider à prévenir le cancer.

Les bienfaits de l'ananas

L'ananas renferme de la bromélaïne, une protéase qui aurait des effets antihypertenseurs, antimicrobiens et surtout anti-inflammatoires. Des recherches *in vitro* montrent que la bromélaïne a la capacité de moduler les lymphocytes T et la phagocytose pour tuer les cellules bactériennes. Par ailleurs, cette substance diminuerait significativement la douleur et la raideur chez les patients souffrant d'arthrose en agissant sur les médiateurs de la douleur comme la bradykinine. La bromélaïne serait ainsi efficace chez les patients souffrant d'inflammation due à l'arthrite et entraînerait une diminution substantielle ou totale du gonflement des tissus mous (6). ■

Sylvie Boistard

(1) Exploring the differential mechanisms of carotenoid biosynthesis in the yellow peel and red flesh of papaya, Shen YH. et al., *BMC Genomics,* 2019.

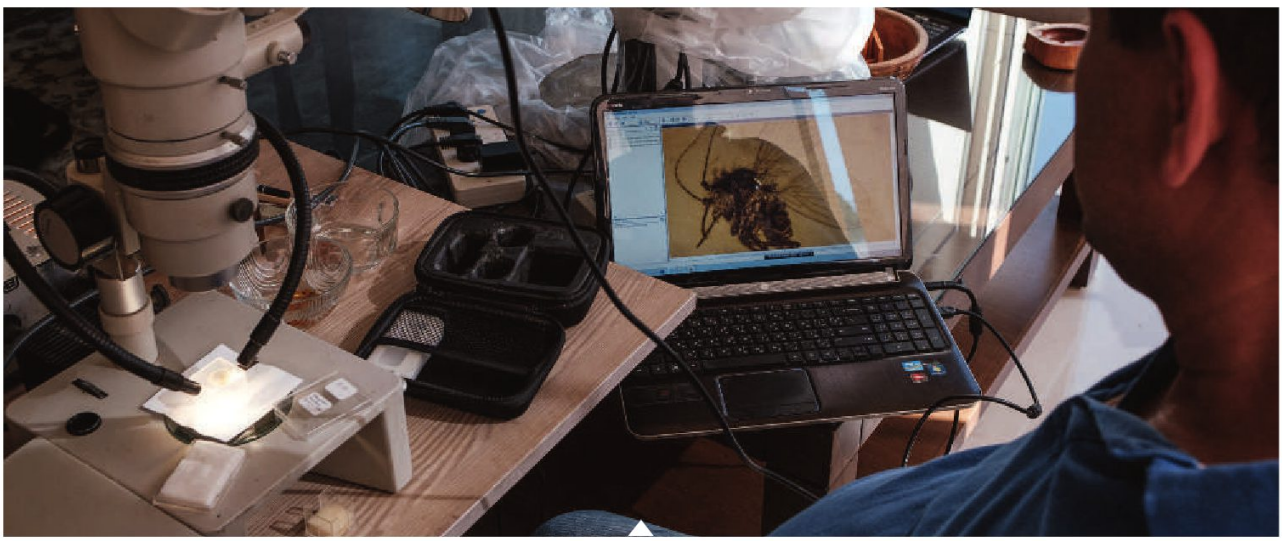
(2) Flavonoids and Their Anti-Diabetic Effects: Cellular Mechanisms and Effects to Improve Blood Sugar Levels, Al-Ishaq R.K. et al., *Biomolecules,* 2019.

(3) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(4) Pomegranate (Punica granatum L.) Extract Effects on Inflammaging, Cordiano R. et al., *Molecules,* 2024.

(5) The Role of Pomegranate (Punica granatum) in Cancer Prevention and Treatment: Modulating Signaling Pathways From Inflammation to Metastasis, Rauf A. et al, *Food Science and Nutrition,* 2025.

(6) Bromelain, a Group of Pineapple Proteolytic Complex Enzymes (Ananas comosus) and Their Possible Therapeutic and Clinical Effects. A Summary, Varilla C. et al., *Foods,* 2021.



La recherche d'inclusions dans l'ambre passe par plusieurs étapes : dans son atelier de Beyrouth, le chercheur Dany Azar doit d'abord tailler le morceau de résine fossile afin de pouvoir le placer entre deux lamelles et étudier au microscope l'insecte qu'il contient.

Fossiles
Les révélations de l'ambre libanais

Au Liban, des paléontologues scrutent l'ambre à la recherche de fossiles piégés dans cette résine issue des conifères. Le premier insecte datant du jurassique y a été trouvé dans un gisement vieux de 155 millions d'années. Les découvertes parmi les plus anciens spécimens d'ambre fossilifère se poursuivent malgré les crises et les guerres.

Par Amélie David. Photos : Sandro Basili pour Sciences et Avenir

Quelque part au milieu des falaises escarpées du Liban, se cachent des trésors emprisonnés dans de l'ambre qui nous aideront à comprendre le passé de la vie sur Terre. En ce matin ensoleillé, les micropaléontologues Dany Azar et Sibelle Maksoud partent à leur recherche. Sur les hauteurs de Hammana, à l'est de Beyrouth, la route dévoile peu à peu une immense falaise, le Jezzinien. Elle est ainsi nommée car elle atteint son épaisseur maximale géologique à Jezzine, ville libanaise où a été définie une unité géologique du même nom. À côté, une autre formation géologique appelée grès du Liban. Cette région est un important site d'étude pour la compréhension de la stratigraphie et de la paléontologie du crétacé inférieur, soit il y a environ 130 millions d'années. Ici, plus de 3000 inclusions ont été prélevées dans l'ambre.

BRUNO BOURGEOIS

La mer apparaît au loin. Au-dessus, la pollution a formé un épais nuage qui voile le ciel bleu. Près d'un large pont où passe la route qui relie la capitale libanaise à la vallée de la Bekaa et qui coupe la falaise en deux, Sibelle Maksoud repère un possible gisement d'ambre. *« Le grès du Liban date du barrémien inférieur* [environ 125 millions d'années, le quatrième étage stratigraphique du crétacé inférieur]. *Dans celui-ci, il y a un bloc marin dans lequel on trouve beaucoup de fossiles : des oursins, des huîtres… Il y a aussi les charophytes, qui sont les premières plantes apparues sur Terre »*, explique la paléon-

Sur la falaise de Kfar Selouane, à l'est de Beyrouth, les micropaléontologues Dany Azar et Sibelle Maksoud collectent de l'ambre.

tologue, à l'approche du site au bord de cette route fréquentée. Le mur qui prévient les éboulements rend plus difficile l'accès au terrain. Elle l'escalade et s'accroche à des racines pour grimper, puis sort de son pantalon de randonnée un petit marteau. *« Honnêtement, pour rechercher l'ambre, nous n'avons pas besoin de grand-chose »*, lance-t-elle en souriant. Là, elle se met à creuser les différentes couches de terre. Sibelle Maksoud lève la tête vers le haut de la falaise : seuls quelques arbres sont plantés : *« Ici, il faut imaginer qu'il y avait une belle forêt tropicale ! Un joli environnement avec les charophytes et de la résine qui se dépose petit à petit pour protéger l'arbre et le tronc. Et puis, autour, il y a les insectes et les dinosaures… »* Elle essuie quelques gouttes de sueur qui perlent sur son front. La recherche de l'ambre demande patience, observation et minutie. Et de savoir casser sans détruire, prélever sans arracher. *« Il faut vraiment creuser la terre ; mais tout ceci, c'est du lignite, du bois, des dépôts végétaux »*, montre-t-elle en ressortant un petit morceau.

PROTECTION

Un trésor national à valoriser

Précieux et important pour la recherche, l'ambre libanais est aussi en danger. Au-delà de la recherche, le micropaléontologue Dany Azar mène un combat pour sa préservation depuis plus de vingt ans. De nombreux sites au Liban sur lesquels il est possible d'en trouver ont disparu. D'autres sont aujourd'hui menacés en raison d'un manque d'information et de sensibilisation de la population, mais aussi par des constructions. Dany Azar tente de convaincre les autorités libanaises de l'importance de protéger ces sites et de créer un muséum d'histoire naturelle. Un lieu où pourrait être conservé l'ambre déjà récolté par les chercheurs. *« C'est un matériel qui doit être valorisé »*, insiste le chercheur. Ce dernier s'attelle aussi à sensibiliser le plus grand nombre à son intérêt. D'abord autour de lui : à l'université, dans sa famille ou lors des fouilles. Plusieurs personnes qui avaient trouvé de l'ambre sur le terrain savent désormais qu'il faut le conserver et le donner aux chercheurs lorsqu'ils en trouvent. *« Nous avons rencontré un homme un jour dans le Akkar* [région au nord du Liban] *qui connaissait l'ambre, qui en avait sur le terrain, mais qui le ramassait et le brûlait car il voyait des choses à l'intérieur et il pensait que c'étaient des mauvais esprits »*, souligne Dany Azar. Le chercheur espère voir l'ambre devenir un trésor national.

Après avoir fait virevolter un peu de poussière et dégagé plusieurs couches, de petites touches rouges apparaissent, très peu visibles à l'œil nu. *« Voilà ! Ce qui est rouge, là… On peut trouver l'ambre de plusieurs couleurs : rouge, jaune, orangé… Là, ce sont des gouttelettes rouges. Des pierres qui peuvent contenir de tout petits insectes. »*

Une période charnière où sont apparues les plantes à fleurs

L'ambre est une résine fossile qui a été sécrétée il y a des millions d'années par des arbres, principalement des conifères. En s'écoulant, elle a piégé des insectes, des morceaux de plantes, des spores et même de l'air ou de l'eau, qui ont formé ce qui est appelé aujourd'hui des inclusions. Une fois tombée, la résine a été recouverte par des couches de sédiments. Elle a ensuite subi une transformation chimique à la faveur d'une conjugaison de facteurs comme le temps, la chaleur, la pression et l'absence d'oxygène. La résine s'est alors durcie et est devenue ambre. Sa taille est variable : d'une goutte d'eau à l'équivalent d'une pièce de monnaie. Peu importe sa grosseur : Sibelle Maksoud l'extrait avec précaution et le range dans un mouchoir blanc. Les morceaux d'ambre seront analysés par Dany Azar. Ce spécialiste de l'ambre libanais depuis plus de trente ans, professeur à l'université libanaise et à l'institut Nanjing, en Chine, retourne dès qu'il est au Liban dans son laboratoire personnel (*lire l'encadré p. 80*).

Les premières recherches scientifiques sur l'ambre du Liban remontent au début des années 1960. En 1962, le professeur

DANY AZAR

« Libanoculex intermedius », le plus ancien moustique trouvé dans l'ambre au Liban, âgé de 130 millions d'années.

Aftim Acra, de l'université américaine de Beyrouth, découvre à Jezzine l'un des plus anciens spécimens d'ambre contenant des inclusions biologiques. Cette découverte marque le début de l'étude paléontologique de l'ambre libanais. À la faveur de scientifiques passionnés, les découvertes se poursuivent, en dépit des crises économiques, sociales et politiques et des guerres. *« L'ambre libanais est important car c'est une fenêtre sur 130 millions d'années* [voire plus lorsqu'il y a des gisements qui datent du jurassique], explique Dany Azar. *C'est à ce moment-là qu'il y a eu un changement drastique dans l'écosystème mondial et que sont apparues les plantes à fleurs. »*

À cette époque, l'actuel Liban occupe une position équatoriale et fait partie du Gondwana, supercontinent ancien qui a existé entre le néoprotérozoïque (environ 600 millions d'années) et le jurassique (environ 150 millions d'années). Cette région bénéficie alors d'une biodiversité très épanouie. *« Il y a très peu de gisements à insectes fossiles connus de cette époque-là,* explique Vincent Perrichot, paléontologue, spécialiste des insectes fossiles à l'université de Rennes. *Le Liban offre l'essentiel des gisements d'ambre que nous connaissons autour de la transition jurassique-crétacé. »* Dans le Liban d'aujourd'hui, les chercheurs en ont répertorié plus de 500 du crétacé inférieur, dont 32 contenant des fossiles, et 19 gisements d'ambre du jurassique terminal.

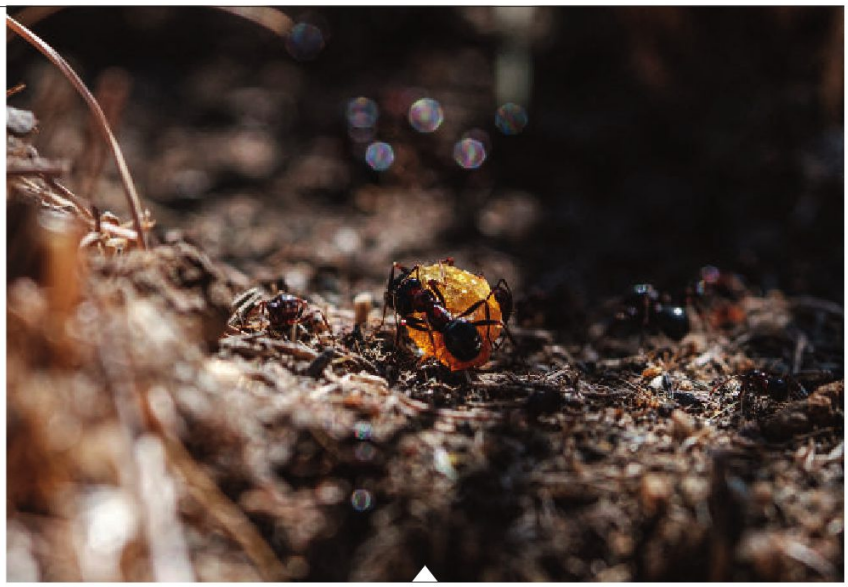
Une espèce identifiée pour la première fois au Liban

Outre le Liban, l'ambre est présent dans plusieurs régions du monde. *« Il y a un ambre plus ancien dans les Dolomites* [Italie]*, mais il n'est pas très bien préservé »*, précise Dany Azar. Le plus célèbre se trouve en Birmanie : un ambre du crétacé supérieur (environ 99 millions d'années) réputé pour la richesse de ses inclusions — insectes, plumes de dinosaures et restes de vertébrés. Le plus abondant est l'ambre balte, daté de 30 à 35 millions d'années. Plus jeune (20 millions d'années), celui de République dominicaine est célèbre pour ses insectes parfaitement conservés. Mais l'ambre du Liban reste pour l'heure unique. *« C'est un des plus anciens ambres fossilifères, qui a livré des fossiles en inclusions d'arthropodes terrestres, de petits vertébrés ou de plantes »*, poursuit Vincent Perrichot.

Sur le site de Hammana, Sibelle Maksoud assène de petits coups de marteau dans la terre grise et ocre de la montagne : *« La terre est passée par plusieurs crises. Nous pouvons les lire dans les couches géologiques et les insectes. Cela permet une comparaison entre biodiversité ancienne et actuelle, en rapport avec les change-*

« L'idée est d'utiliser les insectes comme outil biostratigraphique pour dater les différents niveaux géologiques »

Sibelle Maksoud, micropaléontologue et géologue, professeure à l'université libanaise



L'ambre ne permet pas de conserver l'ADN ancien des insectes qui y sont fossilisés.

ments climatiques. » Les recherches menées par Dany Azar, Sibelle Maksoud et leurs collègues ont mené à d'importantes découvertes. L'ambre emprisonné dans le grès du Liban à Hammana a permis de prélever le *« moustique le plus ancien »*, jubile Dany Azar, qui a publié les résultats à la fin de l'année 2023. Le spécialiste a découvert une espèce identifiée pour la première fois au Liban et seulement dans ce pays, nommée *Libanoculex*. *« Actuellement, chez les moustiques, ce n'est que la femelle qui pique. Sur ce site, nous avons trouvé un mâle avec un appareil buccal hématophage — qui est en mesure de sucer le sang. Nous avions là des représentants d'une espèce qui peuvent raconter une certaine histoire d'un groupe actuel »*, ajoute Sibelle Maksoud.

Une découverte à l'origine de « Jurassic Park »

Autre découverte majeure, cette fois au nord du Liban, près d'Ehden. En mars, Dany Azar et ses collègues ont publié les résultats de leurs recherches au cours desquelles ils ont découvert un insecte, une cochenille, datant de la période du jurassique. *« Il y a tout pour faire une belle histoire et rappeler le film* Jurassic Park », explique-t-il avant de tempérer : *« Actuellement, l'ADN n'est pas préservé dans l'ambre. »* Une précision d'importance sachant que l'histoire de la saga cinématographique est née d'une découverte dans cette région. C'est en effet près de Jezzine qu'Aftim Acra a découvert en 1962 l'une des plus anciennes pierres d'ambre au monde contenant des inclusions biologiques. Une conversation avec son ami et collègue Paul Whalley du muséum d'Histoire naturelle de Londres (Royaume-Uni) à propos de la possible extraction d'ADN d'un insecte fossilisé dans l'ambre, serait parvenue jusqu'à l'écrivain américain Michael Crichton, l'auteur de *Jurassic Park,* adapté ensuite au cinéma par Steven Spielberg.

Sous la falaise de Mreijet, Sibelle Maksoud prend un petit morceau noir entre ses doigts : *« Vous voyez, là, c'est du lignite, des bois fossilisés. Dans les inclusions biologiques que l'on trouve à différents niveaux, les insectes restent les mêmes. L'idée est de les utiliser comme outil biostratigraphique pour dater les différents niveaux géologiques. »*

À quelques kilomètres du site de Hammana se trouve celui de Ain Dara, lui aussi au bord d'une route. Ici, tout est érodé. Pour ramasser de l'ambre, il suffit de se pencher. Sibelle Maksoud continue son exploration près d'une tortue venue se reposer à l'ombre d'arbustes feuillus. Une première petite pierre orange foncé l'attire. Elle la récupère sur le terrain escarpé et, après l'avoir un peu nettoyée, l'observe à la loupe. *« Je vois quelque chose de très joli… Mais ce n'est pas un insecte : ce sont des perforations dans l'ambre. Il s'agit d'un bivalve marin qui a mangé l'ambre et a laissé des trous dedans. C'est à partir de cette observation que l'on peut dire qu'il s'agit d'un niveau redéposé de l'ambre, pas d'un niveau originel »*, décrit-elle. Sibelle Maksoud continue sa collection. Sur le terrain depuis plus de dix ans, la paléontologue a gardé la même fascination. Elle lance dans un rire : *« C'est incroyable le fait de sentir que nous sommes les premiers à toucher ces pièces… depuis plus de 100 millions d'années ! »* ■

LABORATOIRE

Travailler après l'explosion du port de Beyrouth

Soufflé. Le laboratoire de l'université libanaise dans lequel Dany Azar poursuivait ses recherches a disparu lors de l'explosion du port de Beyrouth, le 4 août 2020. Ce jour-là, aux alentours de 18 heures, des centaines de tonnes de nitrate d'ammonium explosent dans le port. L'accident cause la mort de 235 personnes et en blesse plus de 6500. L'université libanaise, où exerce Dany Azar, se situe à une vingtaine de kilomètres de là. *« Les collections n'ont pas été touchées. J'ai réparé ce que j'ai pu réparer »*, relate Dany Azar. Cinq ans plus tard, le laboratoire n'a toujours pas été reconstruit. *« Nous n'avons pas les fonds nécessaires pour renouveler le matériel »*, poursuit-il. Parti travailler en Chine pour des raisons économiques, il a reconstitué un laboratoire pour ses recherches sur l'ambre dans l'appartement familial, où il rapporte les objets de ses explorations et où il travaille avec l'assistance de son épouse, Sibelle Maksoud.

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS
SCIENCES
ET AVENIR

Boostez vos capacités

Une
MÉMOIRE
en pleine forme

GETTYIMAGES

en vente en kiosque

Le petit tyrannosaure n'en était pas un

Une nouvelle analyse du célèbre fossile des « dinosaures en duel » révèle qu'un des squelettes n'était pas un jeune « Tyrannosaurus rex » mais bien une espèce naine distincte, baptisée « Nanotyrannus lancensis ». L'étude réhabilite ce dinosaure controversé, mais le débat est loin d'être clos.

Soixante-sept millions d'années après leur dernier combat, les deux individus extraits en 2006 de la formation de Hell Creek, dans le Montana (États-Unis), livrent enfin leurs secrets. Cette célèbre pièce qui forme le duo des « dinosaures en duel » *(lire l'encadré ci-contre)* présente les squelettes d'un tricératops et d'un petit tyrannosaure de 700 kg entrelacés dans une position de combat. Elle a été étudiée par Lindsay Zanno, paléontologue à l'université d'État de Caroline du Nord (États-Unis) et cheffe de la paléontologie au musée des Sciences naturelles de Caroline du Nord qui abrite les deux fossiles. Elle tire de son travail une conclusion explosive : le tyrannosaure qui combat appartient à une espèce naine nommée *Nanotyrannus lancensis*, dont l'existence est débattue depuis près de quarante ans.

Le nouveau spécimen se distingue par sa complétude exceptionnelle, puisque le tyrannosaure a été conservé avec son squelette presque entier, des os du crâne aux vertèbres caudales. L'analyse de ses tissus osseux, des points de fusion vertébrale et des caractères anatomiques montre qu'il s'agit d'un individu pleinement adulte, mort vers l'âge de 20 ans, avec une croissance stoppée depuis plusieurs saisons. *« Notre spécimen est un* Nanotyrannus *adulte pesant seulement 700 kg après deux décennies de croissance,* explique Lindsay Zanno. *Son anatomie — plus de dents, des bras plus longs, une queue plus courte, un agencement unique des nerfs et sinus crâniens — est incompatible avec l'hypothèse d'un* T. rex *juvénile* », assure-t-elle.

Les motifs de croissance observés sont ceux d'un animal ayant atteint sa taille maximale. Pour James Napoli, coauteur de l'étude et paléontologue à l'université Stony Brook (États-Unis), *« pour que* Nanotyrannus *soit un jeune* T. rex, *il faudrait qu'il contredise tout ce que nous savons du développement des vertébrés. Ce n'est pas seulement improbable, c'est impossible.* »

MHALL/NCSU.EDU

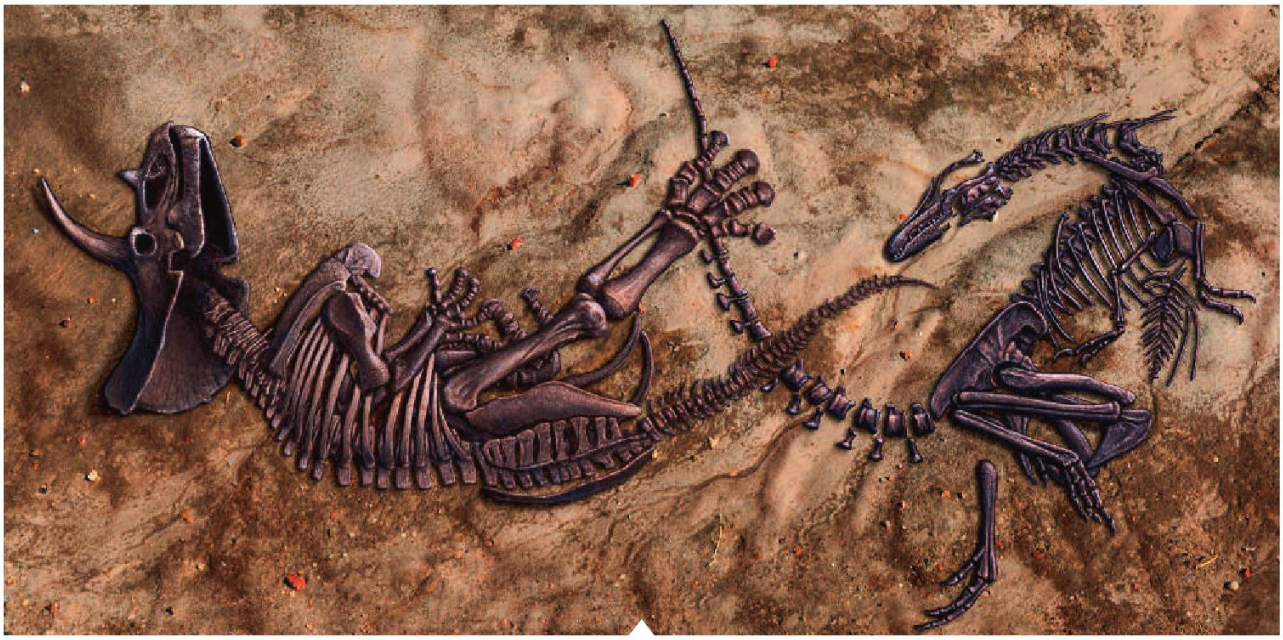
« Son anatomie est incompatible avec l'hypothèse d'un « T. rex » juvénile »

Lindsay Zanno, paléontologue à l'université d'État de Caroline du Nord, aux États-Unis

Les auteurs vont même encore plus loin. En comparant ce *Nanotyrannus lancensis* à d'autres fossiles similaires, ils identifient une seconde espèce, *Nanotyrannus lethaeus*, correspondant au célèbre spécimen Jane du musée Burpee (Rockford, États-Unis). *« Jane partage de nombreux traits uniques avec* N. lancensis, *mais aussi quelques différences,* précise Lindsay Zanno. *Elle semble avoir atteint une masse corporelle légèrement supérieure et se distingue par des caractères liés à son système respiratoire et à sa dentition.* » Ainsi, les chercheurs estiment que cette espèce pouvait peser jusqu'à 1200 kg à l'âge adulte, contre jusqu'à huit tonnes pour un *T. rex* adulte.

Une étude scrutée à la loupe par les spécialistes

La publication fait déjà réagir la communauté paléontologique. Pour Holly Woodward, spécialiste d'histologie des dinosaures à l'université d'État de l'Oklahoma (États-Unis), *« le tissu osseux du fémur et du tibia de NCSM 40000* [*Nanotyrannus lancensis*] *montre que le spécimen approchait sa taille adulte, et je n'ai pas de problème avec cette conclusion du point de vue histologique* ». La paléontologue, qui a toujours été sceptique quant à l'existence d'un *T. rex* nain, semble cette fois-ci convaincue. En revanche, elle se



JULIUS CSOTONYI.

Reconstitution du duo de dinosaures retrouvé dans le Montana (États-Unis). Le fossile à droite serait celui d'un « N. lancensis ».

montre bien plus prudente concernant la création d'une deuxième espèce : « *Attribuer un nouveau* Nanotyrannus *à Jane est problématique. Histologiquement, Jane était encore en croissance et déjà plus grande que* N. lancensis. *On retombe donc dans les mêmes débats morphologiques qu'auparavant.* »

Cette nouvelle étude, publiée dans la revue *Nature*, sera scrutée à la loupe. « *Elle est intéressante, mais elle soulève beaucoup de questions : les preuves histologiques peuvent être ambiguës, tout comme plusieurs des traits anatomiques invoqués pour distinguer* Nanotyrannus *de* T. rex, tempère pour sa part François Therrien, conservateur au Royal Tyrrell Museum à Drumheller, au Canada. *Je crois que cette publication fera couler beaucoup d'encre, mais qu'elle ne convaincra pas la majorité des spécialistes.* »

Ces réserves n'étonnent pas Lindsay Zanno, consciente de la portée symbolique de son travail. « *Nous ne voulions pas simplement alimenter la controverse,* explique-t-elle. *Nous avons vérifié chaque point, croisé les données anatomiques, histologiques et phylogénétiques. De notre point de vue, le débat est clos. Il faut désormais se tourner vers les vraies questions : quelle était la biologie de* Nanotyrannus *? Comment différait-il du* T. rex *et comment ces deux espèces coexistaient-elles il y a 67 millions d'années ?* »

La reconnaissance d'un deuxième tyrannosaure adulte bouleverse la vision établie des écosystèmes du crétacé terminal. Pendant des décennies, les petits squelettes attribués à *N. lancensis* ont servi de référence pour modéliser la croissance et l'écologie du *T. rex*. « *Si les conclusions des auteurs sont exactes, cela remet en cause les études sur la croissance juvénile du* T. rex, confirme Holly Woodward. *Sans ces spécimens, il ne reste presque aucun enregistrement fossile publié sur les jeunes* T. rex, *malgré plus d'un siècle de fouilles.* »

Pour Lindsay Zanno, une révision s'impose : « *Pendant des décennies, les paléontologues ont utilisé* Nanotyrannus *comme modèle pour comprendre la biologie des adolescents de* T. rex. *Ces études doivent être réexaminées.* » Si la distinction entre *Tyrannosaurus* et *Nanotyrannus* se confirme, elle pourrait contraindre les paléontologues à redéfinir l'ensemble de la lignée des tyrannosaures. ■

Joël Ignasse

PROPRIÉTÉ

Bataille juridique autour du fossile

Le fossile des « dinosaures en duel » a été exhumé en 2006 sur le ranch de la famille Murrays, dans le Montana (États-Unis), par l'équipe du chasseur de dinosaures Clayton Phipps. Au départ, aucun musée n'avait accepté de l'acheter. En 2015, des exploitants miniers des sous-sols du ranch des Murrays ont tenté de faire valoir leurs droits sur le fossile, arguant que celui-ci s'est minéralisé avec le temps. La cour suprême du Montana a tranché l'affaire en 2020 : les fossiles ne peuvent être considérés comme des réserves minières telles celles d'or ou de diamant. Les tractations ont alors pu reprendre et le musée des Sciences naturelles de Caroline du Nord a acquis le fossile grâce à une collecte de fonds privés. R. M.

La mobilisation des femmes pour le végétarisme

Si les femmes sont absentes de la plupart des débats intellectuels au XIXe siècle, elles jouent en revanche un rôle central dans la diffusion des pratiques végétariennes au sein de la société. Au nom de la santé, de la spiritualité ou de l'éthique à l'égard de la souffrance animale.

Par Valérie Chansigaud

Les études contemporaines le démontrent clairement : les hommes et les femmes adoptent des régimes alimentaires sensiblement différents. Parmi les nombreuses disparités observées, l'une des plus notables concerne la consommation de chair animale : les femmes suivent plus volontiers des régimes végétariens ou réduits en viande que les hommes. Toutefois, il ne faut pas se méprendre sur la signification de ce phénomène, car une constante se retrouve à toutes les époques et sur tous les continents : les hommes consomment plus de chair animale que les femmes. Cette asymétrie entre les genres ne se limite donc pas strictement au végétarisme ; elle est à la fois culturelle et universelle.

Avant l'apparition du mot « végétarisme », qui se diffuse en Europe après la création de la Vegetarian Society of the United Kingdom (Société végétarienne du Royaume-Uni) en 1847, remplaçant en France le joli terme de « légumiste », on faisait souvent référence à Pythagore pour désigner une alimentation sans viande, d'où l'expression « régime pythagoricien ». Cette célèbre figure de l'Antiquité est largement mythique, car aucun de ses écrits ne nous est parvenu ; nous ne le connaissons qu'à travers des sources indirectes. On lui attribue non seulement des avancées en mathématiques, mais aussi la fondation de la philosophie. De nombreux auteurs classiques, comme Plutarque ou Ovide, le décrivent comme un penseur d'une grande sagesse, rejetant la consommation d'animaux pour des raisons éthiques. Ovide lui prête ainsi ces paroles : *« Quel crime n'est-ce pas d'engloutir des entrailles dans ses entrailles, d'engraisser son corps avide avec un corps dont on s'est gorgé et d'entretenir en soi la vie par la mort d'un autre être vivant ! »*

VALÉRIE CHANSIGAUD

Historienne des sciences et de l'environnement au laboratoire Sphere (Sciences, philosophie, histoire), Valérie Chansigaud a publié « Histoire du végétarisme » en 2023 (Buchet-Chastel).

Une question sensible soulevée par les penseurs européens au XVIIIe siècle

Mais c'est au XVIIIe siècle que de nombreux penseurs européens commencent à soulever régulièrement la question de l'éthique à l'égard des animaux. À cette époque, on cherche à fonder les droits sur la raison plutôt que sur l'arbitraire de l'absolutisme. Peu à peu, ces droits s'élar-

BRIDGEMAN IMAGES- ALAMY/PHOTO12

La Française Louise Michel, les Anglaises Anne Cobden-Sanderson et Anna Kingsford (de gauche à droite) ont chacune inscrit à leur façon le végétarisme dans leur parcours militant.

gissent à des groupes humains qui en étaient privés, comme les esclaves ou les femmes, en s'appuyant sur des arguments liés à la sensibilité et à la souffrance. Contrairement à ce que pourrait laisser croire l'idée de l'animal-machine développée au XVII^e siècle par Descartes, la plupart des philosophes, moralistes et savants des Lumières considèrent que les animaux sont capables de souffrir et possèdent une forme d'intelligence. Dès lors, la cruauté à leur égard devient moralement condamnable. Elle est également perçue comme un danger social, car s'y habituer, notamment dès l'enfance, risquerait de cultiver un goût pour la violence envers les êtres humains. En 1751, la célèbre série de gravures *Les Quatre Âges de la cruauté* de l'Anglais William Hogarth (1697-1764) illustre parfaitement cette idée.

C'est dans ce contexte qu'émergent, dans les années 1830-1840, des mouvements certes très marginaux mais très actifs, prônant un autre rapport aux animaux et prohibant leur consommation. Les motivations sont nombreuses. Tout d'abord, la dimension éthique, voire religieuse, pousse de nombreux chrétiens à relire la *Bible* pour y trouver des raisons de proscrire la cruauté envers les animaux : au jardin d'Éden, Adam et Ève n'étaient-ils pas végétariens ? Cependant, au XIX^e siècle, les arguments avancés deviennent surtout sanitaires : la viande est perçue comme « non naturelle ». En empruntant des voies différentes, de nombreux penseurs concluent ainsi que la consommation d'animaux est contraire à la nature humaine.

La place majoritaire des femmes dans les sociétés de défense des animaux

Si les femmes sont absentes de la plupart de ces débats intellectuels, elles jouent en revanche un rôle central dans la diffusion des pratiques végétariennes au sein de la société. Pour comprendre leur implication, il faut revenir sur leur place dans les structures de défense des animaux, qui se divisent en deux grandes catégories. Avec d'abord les sociétés de protection des animaux, apparues dans tous les pays européens au XIX^e siècle sur le modèle de la Royal Society for the Prevention of Cruelty to Animals, fondée en 1824 au Royaume-Uni. Mais ces organisations ne sont pas les seules à œuvrer pour la cause animale. Il existe également de nombreuses et puissantes associations consacrées à la protection des oiseaux sauvages, en particulier des espèces insectivores, comme la Deutscher Verein zum Schutze der Vogelwelt (1875) en Allemagne, la Royal Society for the Protection of Birds (1890) au Royaume-Uni, ou encore les premières sociétés Audubon (1895) aux États-

Unis. En France, il faudra attendre 1912 pour voir émerger la Ligue pour la protection des oiseaux. Les sociétés allemandes et britanniques, avec des dizaines de milliers de membres, figurent parmi les organisations les plus influentes de la société civile de l'époque. Elles sont majoritairement composées de femmes (jusqu'à 70 % des effectifs), même si, dans la plupart des cas, ces structures restent dirigées par des hommes. Comment expliquer cette forte présence féminine dans la défense animale ? Elle reflète avant tout le poids des stéréotypes. Dans les sociétés profondément sexistes du XIXe siècle, les femmes disposent de peu d'espaces d'expression. Le vaste champ de la sensibilité, de l'empathie face à la souffrance et de l'éducation, notamment morale, constitue l'un des rares domaines où leur engagement est toléré. Même si la plupart des femmes ayant contribué à la diffusion du végétarisme n'ont guère laissé de traces dans les archives, plusieurs figures marquantes sont néanmoins célèbres. Elles permettent, en outre, de saisir la complexité des engagements et des motivations qui ont conduit nos aïeules à adopter le végétarisme.

La première est la militante et auteure anarchiste Louise Michel (1830-1905), dont la participation active à la Commune de Paris lui vaut d'être déportée en Nouvelle-Calédonie. Dans ses *Mémoires*, on trouve ce poignant témoignage : *« Au fond de ma révolte contre les forts, je trouve du plus loin qu'il me souvienne l'horreur des tortures infligées aux bêtes. […] Et plus l'homme est féroce envers la bête, plus il est rampant devant les hommes qui le dominent. »* Pour Louise Michel, comme pour d'autres anarchistes de son temps tel le géographe Élisée Reclus (1830-1905), la domination et la cruauté envers les animaux sont tout aussi scandaleuses que celles exercées sur les êtres humains. Elle poursuit : *« On m'a souvent accusée de plus de sollicitude pour les bêtes que pour les gens ; pourquoi s'attendrir sur les brutes quand les êtres raisonnables sont si malheureux ? C'est que tout va ensemble, depuis l'oiseau dont on écrase la couvée jusqu'aux nids humains décimés par la guerre. La bête crève de faim dans son trou, l'homme en meurt au loin des bornes. Et le cœur de la bête est comme le cœur humain, son cerveau est comme le cerveau humain, susceptible de sentir et de comprendre. »*

AKG IMAGES

Nombre de suffragettes britanniques (ici à Londres en 1909, faisant la promotion de leur journal « Votes for Women ») ont participé à des mouvements prônant le végétarisme.

La viande aurait un effet excitant comparable à celui de l'alcool

La Britannique Anna Kingsford (1846-1888) est, quant à elle, l'une des premières femmes à obtenir un doctorat en médecine. Sa thèse, soutenue en 1880 à Paris, s'intitule : *« De l'alimentation végétale chez l'homme (végétarisme) »*. Elle participe activement aux sociétés végétariennes britanniques et a milité contre la vivisection. C'est aussi une fervente spiritualiste et théosophe qui considérait qu'il y avait une dimension spirituelle dans le végétarisme. En 1889, une compilation de ses visions mystiques est publiée. Dans un essai sur le végétarisme paru en 1881, Anna Kingsford souligne que la viande nourrit l'être humain de manière imparfaite et exerce un effet excitant com-

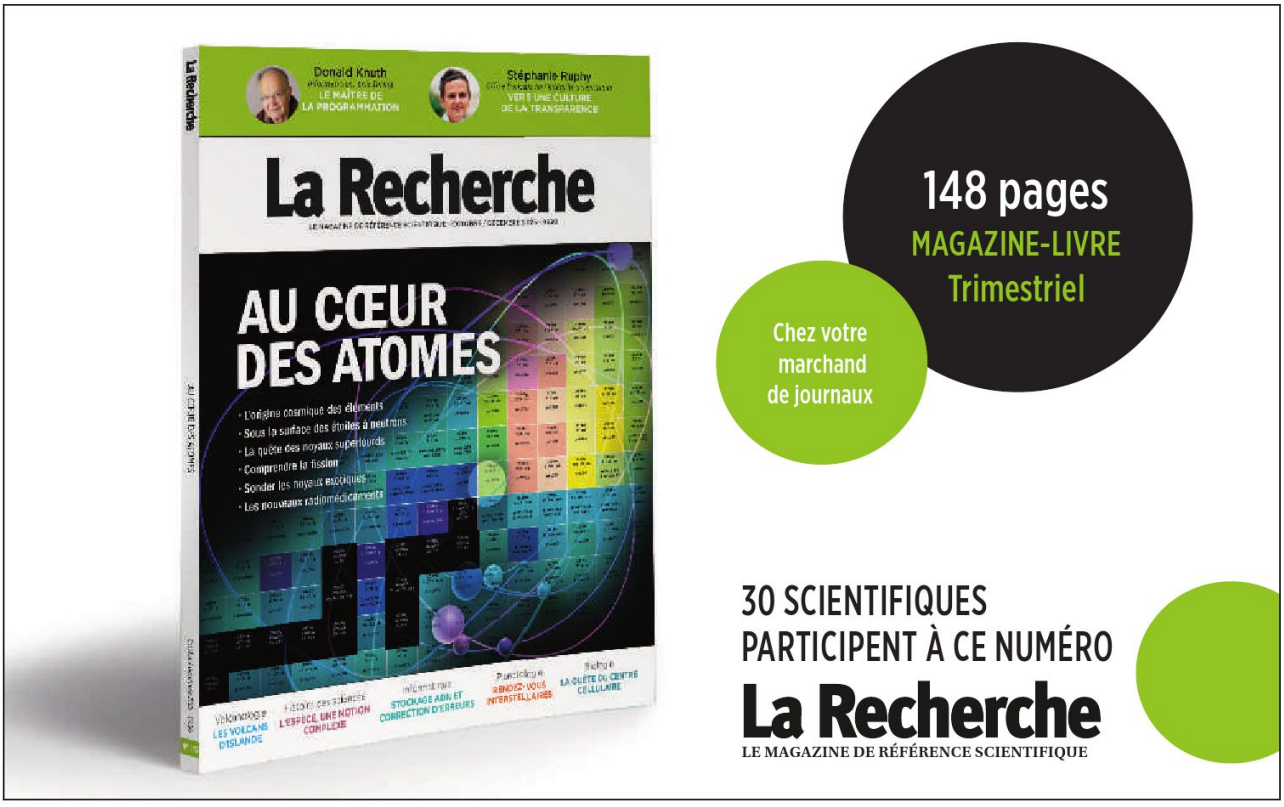
ÉTATS-UNIS

Le végétarisme au cœur de l'Église adventiste du septième jour

L'Église adventiste du septième jour a été fondée en 1863 aux États-Unis, dans le sillage du mouvement millénariste d'inspiration protestante. Elle accorde alors une place singulière à la santé et à l'hygiène de vie, conçues comme partie intégrante de la pratique religieuse. À l'image de nombreux courants du XIXe siècle, religieux ou laïcs, les adventistes défendent la tempérance, le repos sabbatique et la promotion d'un mode de vie « naturel », au sein duquel le végétarisme occupe une position centrale bien que non obligatoire. Ce choix s'appuie à la fois sur une lecture biblique et sur une justification hygiéniste et spirituelle formulée par Ellen G. White (1827-1915), l'une des fondatrices du mouvement : la consommation de viande, mais aussi d'alcool, de tabac et de café, altère le corps, considéré comme le temple de l'Esprit saint. Ce lien étroit entre foi et santé a favorisé la création d'hôpitaux et contribué à l'émergence d'une culture alimentaire végétarienne en Occident. Aujourd'hui encore, le végétarisme demeure une marque identitaire forte du mouvement, et les adventistes font régulièrement l'objet d'études épidémiologiques visant à mesurer l'impact de l'abstinence de viande sur la santé.

Au XIXe siècle, le vaste champ de l'empathie face à la souffrance est l'un des rares domaines où l'engagement des femmes est toléré

parable à celui de l'alcool. Sa consommation régulière favoriserait les comportements immoraux et freinerait le progrès de la civilisation.
Autre figure intéressante : Anne Cobden-Sanderson (1853-1926), qui naît dans une famille aisée de Londres (Royaume-Uni), dont le père est un homme politique libéral et radical influent. Elle fréquente le socialiste et écrivain William Morris (1834-1896) ainsi que son épouse Jane Burden (1839-1914), égérie et modèle du mouvement artistique préraphaélite. Anne Cobden-Sanderson milite activement au sein du Parti travailliste indépendant. Arrêtée en octobre 1906 en tant que suffragette, elle fonde l'année suivante la Women's Freedom League puis publie, en 1908, le texte *How I Became a Vegetarian*. La même année, elle participe à la création du New Food Reform Movement destiné à promouvoir une alimentation saine. C'est l'un des innombrables mouvements qui émergent à cette époque pour promouvoir un autre mode de vie, plus naturel et refusant les artifices modernes. Ces trois exemples illustrent la diversité des motivations qui conduit un grand nombre de femmes à adhérer au XIXe siècle au végétarisme, mêlant santé, spiritualité et éthique. On peut y voir l'expression d'une sensibilité naturelle et d'une tendance à la compassion — que les contemporains ont souvent critiquée ! —, mais aussi le reflet des stéréotypes et de la misogynie ambiante, qui limitent alors les espaces où les femmes peuvent s'exprimer. Il est intéressant de noter aussi que ces trois femmes se sont, à des degrés divers, engagées dans un combat plus large pour des causes sociales et politiques. Enfin, une autre dimension, rarement mise en avant, mérite d'être soulignée : il était sans doute plus aisé pour une femme de renoncer ou de réduire fortement sa consommation de viande, car celle-ci jouait un rôle bien moins central, par rapport aux hommes, dans la construction de son identité. ■



SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 88

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Questions de lecteurs
p. 94

▶ Courrier
p. 95

▶ Le ciel du mois
p. 96

▶ À retrouver sur notre site
p. 98

SPÉCIAL NOËL - BEAUX LIVRES

Ces territoires qui font nation

« La France des 1000 lieux » raconte les liens qui se sont construits entre les communautés humaines et les mondes qu'elles habitent.

ATTACHEMENT Cet atlas étonnant s'inscrit dans le renouveau de la « géographie culturelle », une manière d'analyser les territoires apparue à la fin du XIXe siècle. Elle s'attache à raconter les liens qui se sont construits entre les communautés humaines et les mondes qu'elles habitent, et comment ceux-ci évoluent. L'histoire des 95 ha de jardins familiaux de Saint-Étienne, hérités du début du XXe siècle, montre comment cette activité permet aux habitants de s'approprier l'espace urbain, de façonner la biodiversité et de remettre *« de l'esthétisme dans une ville qui a souffert de la fermeture de ses mines et de ses manufactures »*. À Marseille, les 12 sites de jardins familiaux et plus de 50 sites de jardins partagés créent du bien-être et du lien social, ce qui finit par influencer les prix de l'immobilier. *« Les classes populaires peuvent ainsi subir l'augmentation des loyers et être contraintes de déménager, alors même que ces projets leur sont au départ destinés et qu'elles ont participé à leur élaboration. »*

Des fils invisibles mais puissants

Ce sont ces trajectoires uniques de milieux, régis également par leurs géologie et géographie physique, redéfinis au fil des siècles par l'agriculture, les pratiques sociales et l'histoire, que nous dévoile cet ouvrage, qui s'intéresse ainsi aux paysages de jardins, bocages, bords de mer, marais, volcans et montagnes. Chaque chapitre s'achève par des cartes de « géographie fiction » réalisées à partir d'hypothèses telles que la *« remise en bocage »* de la France en se fondant sur la qualité de ses sols. Réalisé par deux géographes et deux illustratrices, il se veut à la croisée de la rigueur scientifique et de la cartographie symbolique, pour faire *« glisser la discipline d'une science des lieux vers une science des liens, ces fils invisibles mais puissants qui nous attachent à la terre, à la mémoire et aux autres »*. ■ **Sylvie Rouat**

La France des 1000 lieux,
Damien Deville, Perrin Remonté, Cassandre Lepicard, Julianne Sedan, Ulmer, 192 p., 38 €

PHOTOS: BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Entre terre et mer

ÉCOSYSTÈME Les Pickford, un couple de photographes naturalistes sud-africains, sont partis autour du globe durant quatre ans pour documenter ses dernières côtes sauvages. Soit ces espaces dynamiques entre terre et mer, qui n'occupent que 7 à 10 % de la surface de l'océan mais concentrent plus de 90 % de la vie marine. Ce livre très grand format donne à voir en plus de 200 photos les beautés époustouflantes de ces milieux, aujourd'hui fragilisés par les activités humaines. Les couleurs des poissons et des coraux, les mouvements déliés des mammifères marins explosent en doubles pages, dans lesquelles vient parfois s'insérer un cahier décrivant, avec un ton souvent personnel, les lieux explorés. Un plaidoyer monumental pour la protection de ces écosystèmes. ■ **S. R.**

Wild, Peter et Beverly Pickford, Paulsen, 340 p., 49 €

Les sciences dures en s'amusant

BD Voici réunie en un seul ouvrage la trilogie en bande dessinée *Quantix*, *Infinix* et *Cosmix*, qui nous fait découvrir avec humour et à travers le quotidien de personnages ordinaires comment physique quantique, relativité, théorie du chaos et biologie évolutive tirent les ficelles de notre monde. Au-delà du

récit ludique de principes abstraits, qui fait aussi la part belle à l'histoire des découvertes, ce volume explore les limites et les questionnements de la science actuelle. ■ **S. R.**

Quantix, l'intégrale, Laurent Schafer, Dunod, 544 p., 49 €

Un mouvement perpétuel

GÉOHISTOIRE **À la base, un objet (la sous-tasse, l'étrier…), un aliment (l'ananas, la pomme de terre…), un phénomène (la diversité linguistique, la mesure de la Terre…), des personnages (Christophe Colomb, les navigateurs austronésiens…), ou même une… danse (le tango). À partir de ces éléments, Christian Grataloup tire les fils d'une histoire fantastique : celle des mouvements des êtres humains sur Terre, de leurs échanges, de leurs rapports de force. Nous sommes de *« perpétuels migrants »*, et ce livre tout en images, en cartes et en textes nous le rappelle de fort jolie manière.** ■ **V. G.**

L'Esprit d'aventure, Christian Grataloup, Lionel Portier, Armand Colin, 184 p., 26,90 €

Épopée visuelle

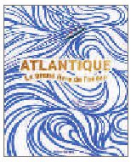
ÉCLAIRAGE Dans ce magnifique ouvrage, Vincent Glavieux, notre confrère journaliste à *La Recherche*, rassemble 300 images de science spectaculaires — des particules élémentaires aux

plus lointaines galaxies — issues des plus grands laboratoires et observatoires. Chaque cliché, tour à tour poétique et saisissant, s'accompagne d'un texte clair et précis, invitant à la contemplation et à la compréhension du monde. ■ **L. L.**

Un monde à découvrir. Des atomes aux étoiles, les plus belles images de science, Vincent Glavieux, Éditions 41, 328 p., 29 €

Les richesses de l'océan

PORTRAIT Sous la houlette d'Emmanuel de Fontainieu, directeur du Centre international de la mer à Rochefort, une vingtaine de plumes (historiens, navigateurs, scientifiques, journalistes…) accompagnées d'illustrateurs



dressent un portrait composite de l'océan Atlantique et des humains qui l'ont sillonné. Un récit aussi documentaire que visuel et poétique. Notre collaborateur de *Sciences et Avenir*, Loïc Chauveau, signe deux chapitres sur les vagues et la circulation océanique. ■ **M. N.**

Atlantique, le grand livre de l'océan, Emmanuel de Fontainieu, Éditions Sud Ouest, 224 p., 39,90 €

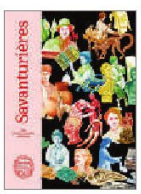
Imaginer le futur du voyage aérien

BD À l'heure du réchauffement climatique, l'aviation est-elle encore compatible avec un avenir désirable ? *Planète Ciel* explore quatre futurs possibles pour le transport aérien à l'horizon 2050. L'ouvrage, porté par le centre d'innovation technologique et sociale Matrice, est issu d'un dialogue entre ingénieurs, militants, artistes et acteurs politiques. Chaque scénario met en scène des tensions bien réelles : innovation à tout prix ou sobriété, mobilité ou justice sociale, croissance ou contrainte climatique. Chaque histoire mêle pédagogie et péripéties pour imaginer comment l'on peut encore se relier au ciel… ■ **F. N.**

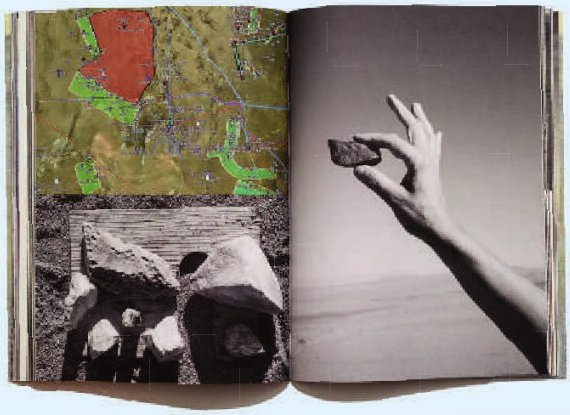
Planète ciel, Héloïse Chochois, Maureen Guérin, Elie Huault, Pierre Jeanneau, Matrice, Dunod, 136 p., 22,90 €

Histoire naturelle au féminin

HOMMAGE Trop souvent oubliées, les femmes qui jalonnent l'histoire des sciences sont pourtant nombreuses. Ce livre superbement illustré par des photos et des dessins leur rend justice : de la pionnière de l'anatomie Marie-Marguerite Bihéron à l'anthropologue Évelyne Heyer, défile ici la grande richesse des sciences au féminin. ■ **A. De B.**



Savanturières, Serge Reubi (dir.), Muséum national d'histoire naturelle, 304 p., 39 €



Des météorites sur Atacama

EXPÉRIENCE **Une équipée extraordinaire a rassemblé dans le désert d'Atacama, au Chili, un astrophysicien, une peintre et un photographe, pour *« renouer avec une tradition ancienne, quand scientifiques et artistes voyageaient de concert »*. Le résultat ? Un carnet de route sensible et envoûtant, où les mots du chercheur scandent le dialogue entre les clichés en noir et blanc et les nuances pastel des peintures, dans une quête des pierres venues de l'espace, météorites accumulées en ce lieu hanté par les ardeurs du soleil.** ■ **A. De B.**

Un désert, des météorites, Matthieu Gounelle, Alexandra Roussopoulos, Julien Magre, Muséum national d'histoire naturelle, Ulmer, 168 p., 32 €

Grandeurs cosmiques

BD Les chiffres, proprement astronomiques, qui régissent l'Univers, ses planètes, ses étoiles, ses galaxies, leurs dimensions, les distances les séparant, ont quelque chose de vertigineux et d'intimidant. Pour mieux les appréhender et les domestiquer, Théo Drieu, de la chaîne Youtube Balade Mentale, les a couchés sur papier avec l'aide du dessinateur Giulia Mammone. Histoire d'être un peu moins perdu dans l'infinité cosmique… ■ **H. R.**

Voyage dans l'infiniment grand, Théo Drieu, Giulia Mammone, Delcourt, 160 p., 24,50 €

Panorama illustré des connaissances

JEUNESSE Vous rêviez d'apprendre à vos enfants en un coup d'œil et de manière ludique comment se forme un tsunami, quels sont les animaux les plus meurtriers de la Terre, comment ont évolué les instruments de musique, et, pourquoi pas, ce qu'est l'ADN ? Alors plongez dans ce panorama des connaissances en images, organisé par séquences — l'Univers, l'espace, notre planète, le corps humain… — où des infographies sourcées et hautes en couleur mettent brillamment en scène toutes sortes d'informations. Truffé de problématiques très actuelles, comme la prolifération des débris spatiaux ou les caractéristiques de l'intelligence artificielle, ce livre aussi beau que malin n'est pas interdit aux adultes ! ■ **A. De B.**

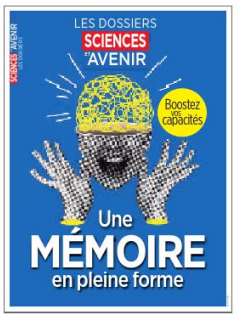
Encyclopédie infographica, Valentina D'Efilippo, Andrew Pettie, Conrad Quilty-Harper, Les Arènes, 336 p., 29,90 €

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE



UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

4,6 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

2,7 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2 millions de fans !	plus de 303 000 followers	plus de 165 000 instagrammeurs	Plus de 67 000 abonnés professionnels	plus de 23 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

▶ **Ce symbole désigne les nouvelles expositions**

EXPOSITIONS

Boulogne-sur-Mer (62)

▶ **Échappée tropicale**
La zone tropicale de Nausicaá a rouvert en septembre après plusieurs années de travaux. 12 aquariums et aquaterrariums composent un parcours conçu comme une balade en bord de mer. Lire notre reportage : sciav.fr/946nausicaa
Nausicaá, Centre national de la mer, boulevard Sainte-Beuve. Rens. : 03.21.30.99.99.

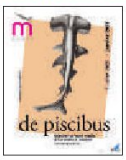
Chambéry (73)

▶ **Jour sur la nuit**
La nuit est un monde fascinant, parfois inquiétant, observé ici dans un parcours interactif et ludique. Entre écologie, psychologie, astronomie et culture.
Galerie Eurêka, 150, rue de la République, jusqu'au 26 août 2026. Rens. : 04.79.60.04.25.

Grenoble (38)

▶ **Rouge comme neige**
Un phénomène atypique se produit une fois par an dans les Alpes, entre 2000 et 3000 mètres d'altitude : des neiges fondantes se teintent de rouge en raison de la présence de micro-organismes. L'occasion d'évoquer la vulnérabilité du milieu montagneux.
Muséum, 1, rue Dolomieu, jusqu'au 26 juillet 2026. Rens. : 04.76.44.05.35.

La Rochelle (17)



▶ **De piscibus**
Du XVIe siècle à aujourd'hui, une histoire de l'illustration scientifique de la faune marine, en Europe, en partant de l'ouvrage *De piscibus* (1638) du naturaliste italien Ulisse Aldrovandi.
Muséum, 28, rue Albert-1er, jusqu'en janvier 2026. Rens. : 05.46.41.18.25.

Lyon (69)

▶ **Zombis, aux origines**
Le zombi est replacé dans son contexte haïtien, dans un propos croisant spiritualité, anthropologie, folklore, arts et esclavage. Reprise d'une exposition du musée du Quai-Branly-Jacques-Chirac.
Musée des confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 16 août 2026. Rens. : 04.28.38.12.12.

Marseille (13)

▶ **Aden-Marseille**
L'histoire des échanges entre deux villes-ports emblématiques. Outre des prêts, sont présentés une trentaine d'objets provenant du Yémen, offerts à Marseille au tournant du XXe siècle par la Compagnie des messageries maritimes et la famille Riès, négociants en café.
Centre de la Vieille-Charité, 2, rue de la Charité, jusqu'au 29 mars 2026. Rens. : 04.91.14.58.80.

Paris (75)

▶ **Les gens de Paris 1926-1936**
Un regard sur la population de la capitale dans l'entre-deux-guerres, à partir de trois recensements, pour la première fois nominatifs.
Lire notre reportage : sciav.fr/946gens
Musée Carnavalet, 23, rue Madame-de-Sévigné, jusqu'au 8 février 2026. Rens. : 01.44.59.58.58.

▶ **M.C. Escher**
Une rétrospective-événement : les célèbres métamorphoses, perspectives impossibles et autres paradoxes géométriques inspirés des mathématiques

PETER CATON, 2020

Au Soudan du Sud, une famille quitte son habitat avec son bétail après des inondations en 2020.

Paris (75) / Exposition

SCIENCES ET AVENIR PARTENARIAT

Migrations et climat

Le dérèglement climatique ne va pas provoquer des flux migratoires. Il le fait déjà. *« Ce n'est pas une réalité lointaine, ce n'est pas une réalité du Sud, monolithique avec une immigration du Sud vers le Nord, c'est une réalité extrêmement diverse qui nous touche directement »*, insiste Constance Rivière, directrice générale du palais de la Porte-Dorée. Fait inédit, cette exposition occupe les deux institutions du lieu, le Musée national de l'histoire de l'immigration et l'Aquarium tropical car le sujet embrasse l'ensemble du vivant (caribous, papillons monarques, faune marine). Même si les déplacements humains prennent une bonne part du propos. Avec, au cœur du parcours, un ensemble de neuf études de cas, de la Vendée au Vietnam, de la Louisiane au Soudan du Sud. L'exposition se fonde sur des données scientifiques en y associant des œuvres d'art, qui témoignent d'événements passés ou contemporains.
Lire notre reportage : sciav.fr/946migrations ■

Arnaud Devillard

Musée national de l'Histoire de l'immigration, 293, avenue Daumesnil, jusqu'au 5 avril 2026. Rens. : www.palais-portedoree.fr

de l'artiste néerlandais.
Monnaie de Paris, 11, quai Conti, jusqu'au 26 mars 2026.
Rens. : escher-expo.com/paris

▶ Momies
Les rites, la symbolique et les techniques d'une pratique qui concerne tous les continents depuis des millénaires. Neuf corps momifiés sont présentés.
Musée de l'Homme, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 25 mai 2026.
Rens. : 01.44.05.72.72.

▶ Rêveries de pierre : poésie et minéraux de Roger Caillois
En partenariat avec le Muséum national d'histoire naturelle, près de 200 pièces de la collection de minéraux et gemmes de l'écrivain Roger Caillois sont mises en regard de ses essais inspirés par ces pierres.
École des arts joailliers, 16 bis, boulevard Montmartre, jusqu'au 29 mars 2026. Visite sur réservation.
Rens. : sciav.fr/946caillois

Strasbourg (67)

▶ Biodivercité
Les espèces animales peuplant les villes, en particulier Strasbourg, dans cinq milieux types : la rue, les égouts, le parc, la cathédrale et la friche urbaine.
Musée zoologique, 29, boulevard de la Victoire, jusqu'au 31 décembre 2026.
Rens. : 03.68.98.50.00.

Paris (75) / Expérience immersive

Destination Lune

CULTURESPACES-CYRILLE DE LA MOTTE ROUGE

Les visiteurs se trouvent de plain-pied sur le sol lunaire avec les astronautes.

Dans un jeu audacieux de sons et lumières, cette immersion de 50 minutes, coécrite par l'acteur américain Tom Hanks, relate l'histoire de la conquête spatiale lunaire. Images et vidéos d'archives de la Nasa sont projetées sur tous les murs, avec des témoignages d'astronautes de la mission Artemis II (prévue d'ici à avril 2026) entre les séquences. Ainsi des images historiques de la descente de l'astronaute américain Neil Armstrong le 21 juillet 1969 ou des vues du paysage lunaire. Des effets dignes d'œuvres cinématographiques transforment le décollage de la fusée Saturn V (qui a emporté les astronautes de la mission Apollo 11) en une véritable expérience sensorielle.
Lire notre reportage : sciav.fr/946lune ■ **Julien Boughon**
Atelier des Lumières, 38, rue Saint-Maur. Rens. : www.atelier-lumieres.com

Toulouse (31)

▶ Domestique-moi si tu peux
Un récit de la domestication, phénomène complexe qui remonte à plus de 10 000 ans, et une réflexion sur ses effets sur les organismes, la génétique et la biodiversité.
Lire notre reportage : sciav.fr/946domestication
Muséum, 35, allées Jules-Guesde, jusqu'au 5 juillet 2026.
Rens. : 05.67.73.84.84.

PARTENARIAT SCIENCES AVENIR

Niort (79)

Prix Photographie et sciences
La villa Pérochon, Centre d'art photographique de Niort, présente les travaux des deux primés, *Planeta*, de Julien Lombardi (2024), autour de l'exploration de l'espace, et *L'île naufragée* de Richard Pak (2021), consacré à une petite île du Pacifique.
Lire notre reportage : sciav.fr/946photos
Villa Pérochon, 64, rue Paul-François-Proust, jusqu'au 21 février 2026.
Rens. : 05.49.24.58.18.

Scannez ce QR code pour retrouver toutes les expositions

Une formidable diversité
11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 937
La fin du Gulf Stream

N° 938
Booster son immunité

N° 939
Les nouvelles armes

N° 940
Comment Sapiens a conquis le monde

N° 941-942
Les 25 grandes découvertes

N° 943
Dossier spécial Alzheimer

N° 944 Seuls ? À la recherche de la vie ailleurs

N° 945 La science peut-elle sauver le climat ?

Bon de commande

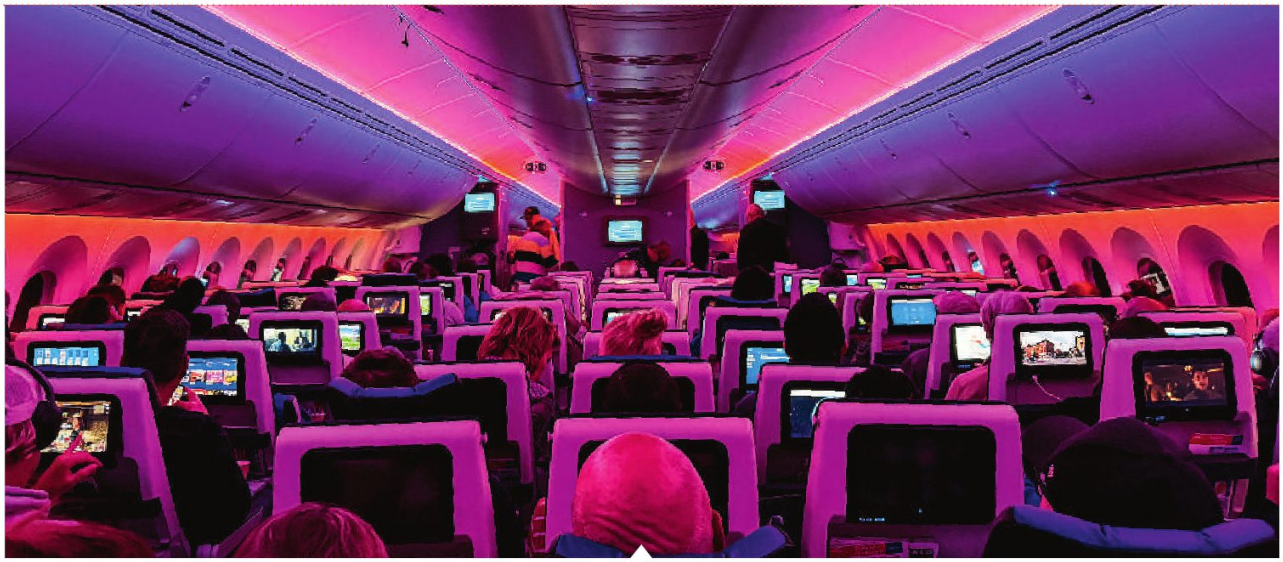
Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir - service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 937 ❑ N° 938 ❑ N° 939 ❑ N° 940
❑ N° 941/942 ❑ N° 943 ❑ N° 944 ❑ N° 945

Nom : .....
Adresse : ..... Ville : .....
.....
Code postal : .....

Posez vos questions sur la page **Facebook** de **Sciences et Avenir**



FRANÇOIS LOCHON/GAMMA RAPHO

Lorsque la teneur en oxygène s'abaisse dans l'atmosphère ambiante (comme ici dans une cabine d'avion), l'organisme compense par une accélération du rythme cardiaque et de la respiration, un phénomène plus ou moins bien toléré selon les individus.

PHYSIOLOGIE

Pourquoi certaines personnes ressentent-elles vite un manque d'air dans les lieux clos ?

Michel L.

Cette sensibilité s'explique par des raisons à la fois physiologiques et environnementales. Il faut savoir que l'air que nous respirons contient environ 21 % d'oxygène au niveau de la mer, mais cette proportion baisse dans bien des situations : locaux mal ventilés où s'accumule le dioxyde de carbone (CO_2), cabines d'avion pressurisées à l'équivalent de 2000 mètres d'altitude (15 à 17 % d'oxygène), zones enfumées, etc. Ces variations passent souvent inaperçues : notre organisme compense par une respiration et un rythme cardiaque accrus.

Toutefois, lorsque l'air descend sous 19,5 % d'oxygène, on parle d'« atmosphère appauvrie » selon l'Osha (l'agence américaine de sécurité au travail). Essoufflement, maux de tête, vertiges ou troubles de la concentration sont alors possibles. À 17-18 %, le sang s'oxygène moins bien et le cœur pompe davantage. Certaines personnes détectent ces variations plus vite : sensibilité physiologique ou apprentissage des signaux faibles (respiration rapide, oppression). C'est le cas des sportifs de haut niveau, ou encore des professionnels formés aux oxymètres, qui associent leurs sensations à des chiffres précis : bip d'alarme à 16 %, gêne à 17 %.

La chaleur renforce le problème : la transpiration refroidit mal le corps quand l'air est humide, il surchauffe alors et la respiration s'accélère. L'hyperventilation qui s'ensuit fait baisser le CO_2 sanguin, modifiant la chimie du sang et amplifiant le malaise. En été, un local mal ventilé à 25 °C peut vite devenir étouffant, non seulement en raison de la chaleur, mais aussi par un déficit relatif d'oxygène.

La tolérance à l'hypoxie (baisse de la concentration d'oxygène dans le sang) dépend de l'âge, de l'état de santé, de la forme physique ou de la génétique. Selon l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), des individus ne ressentent les effets qu'à 15 %, d'autres dès 19 %. D'où ces disparités : certains restent indifférents, d'autres doivent sortir prendre l'air. Mais cette sensibilité n'est pas anodine : sous 17 %, la vigilance baisse et les réflexes ralentissent. Dans un cadre professionnel, cela peut devenir dangereux. D'où l'importance d'une bonne ventilation et d'un suivi régulier de la qualité de l'air, par capteur de CO_2 ou oxymètre, surtout dans les espaces clos accueillant du public. ■

Lise Loumé

OCÉANOLOGIE

La mer Méditerranée peut-elle craindre un tsunami ?

Sophia A.

Oui, la mer Méditerranée est une zone à risque de tsunami. Bien qu'elle soit semi-fermée, elle se trouve à la jonction de plusieurs plaques tectoniques. Une faille sismique, entre Nice et Savone (Italie) et une autre au large de l'Afrique du Nord peuvent engendrer des séismes capables de provoquer des vagues destructrices. Selon l'Unesco, il existe près de 100 % de probabilité qu'un tsunami de plus d'un mètre frappe les côtes méditerranéennes d'ici à 30 ans. Le Centre d'alerte aux tsunamis (Cenalt), créé en 2012 et basé à Bruyères-le-Châtel (Essonne), surveille en permanence la grande bleue. ■ **L. L**

ASTRONOMIE

Que sont les taches solaires ?

Denis V.

Les taches solaires sont des zones sombres visibles à la surface de notre étoile. Elles apparaissent lorsque d'intenses champs magnétiques perturbent la circulation de chaleur, ce qui abaisse leur température à environ 4000 °C (contre 5800 °C pour le reste de la surface du Soleil). Ces taches, parfois larges comme plusieurs Terre, sont le siège d'éruptions puissantes projetant dans l'espace des milliards de tonnes de matière, qui peuvent engendrer des aurores boréales en atteignant la Terre. Le nombre de taches solaires suit un cycle d'environ onze ans, marqué par l'inversion des pôles magnétiques solaires, un phénomène encore mystérieux. ■ **L. L.**

Courriels à : courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

« Seuls ? À la recherche de la vie extraterrestre »
(*Sciences et Avenir* n° 944, octobre 2025)

Dans ce dossier très complet, ne manque-t-il pas un article sur le paradoxe de Fermi et ses développements pour expliquer pourquoi nous n'avons jamais rencontré aucune trace d'une « vie » extraterrestre, pourtant probable de l'avis de tous les spécialistes ?

Vincent Maunoury

S. et A. : Ce dossier était consacré aux biosignatures, les traces chimiques et physiques d'une possible biologie extraterrestre, devenues prépondérantes depuis une vingtaine d'années dans les recherches d'une vie ailleurs. Le paradoxe de Fermi fait plutôt référence aux technosignatures — un signal radio par exemple — produites par d'hypothétiques civilisations avancées. Il a été énoncé par le prix Nobel et physicien italo-américain Enrico Fermi au début des années 1950. Puisque la galaxie est très vieille et qu'il existe des dizaines de milliards d'étoiles, certaines beaucoup plus vieilles que le Soleil, un grand nombre de civilisations auraient eu le temps de se développer jusqu'à maîtriser le voyage interstellaire, présume-t-il alors. Des milliers d'espèces auraient dû nous rendre visite, or nous n'en avons trouvé aucune trace. Depuis le milieu du XX[e] siècle, une foule de réponses ont été proposées par les scientifiques et auteurs de science-fiction : l'évolution biologique ne favorise pas l'intelligence et la complexité ; les voyages interstellaires seraient très difficiles voire impossibles ; la durée de vie des civilisations technologiques pourrait être inférieure à leur rythme d'apparition ; elles se cacheraient par crainte d'être dominées et détruites, etc.

Cadmium et cancers

Dans l'article sur les cancers précoces (*S. et A.* n° 944), je m'étonne que l'exposition au cadmium ne soit pas citée comme une cause possible, notamment des cancers du pancréas ? **B. Putigny**

S. et A. : Vous avez raison, le cadmium est un métal lourd classé cancérogène avéré par le Centre international de recherche sur le cancer (Circ). Il est surtout lié pour le moment aux cancers du poumon et du rein. Quelques travaux évoquent aussi un lien possible avec le cancer du pancréas, mais les preuves restent limitées et aucune relation causale n'a encore été démontrée en lien avec l'augmentation des cancers chez les moins de 50 ans. Toutefois, l'exposition chronique, notamment *via* les engrais phosphatés, le tabac et l'alimentation, est bien documentée. En France, des réglementations visent à en réduire la concentration, et les médecins préconisent d'éviter une surexposition des enfants aux métaux lourds. Le cadmium fait donc bien partie des pistes environnementales surveillées par les chercheurs, au même titre que les pesticides, les perturbateurs endocriniens ou les microplastiques, cités dans l'article.

Précision

Dans l'article sur le théorème de Hawking (n° 945), il fallait lire que la fusion de deux astres de 240 000 km² au total a formé un trou noir final de 400 000 km², et non la fusion de deux astres de 240 000 km² chacun.

LE CIEL DE DÉCEMBRE

PAR JOHAN KIEKEN

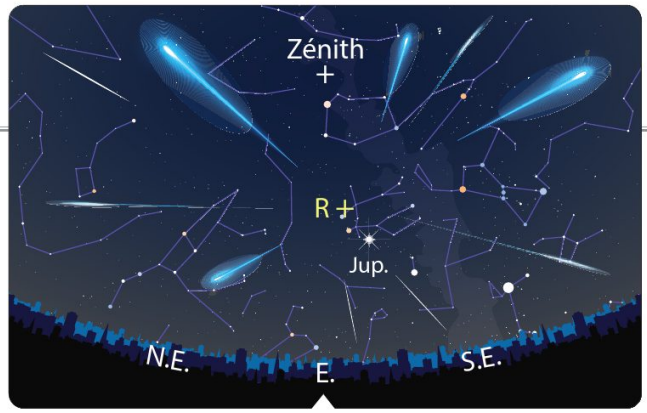
Où sont les planètes ?

MERCURE
La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (près de 21°) à l'ouest du Soleil le 7. Elle reste visible le matin pendant près de trois semaines, profitant de l'inclinaison encore marquée de l'écliptique sur l'horizon à l'aube et de sa position légèrement au nord de celui-ci, qui la place plus haut dans le ciel.

VÉNUS
L'étoile du Berger n'est pas observable, trop proche de la direction de l'astre du jour.

MARS
La planète Rouge n'est pas visible ce mois, pour les mêmes raisons que Vénus.

JUPITER
À un mois de son passage à l'opposition, la reine des planètes se trouve déjà dans d'excellentes conditions d'observation. Elle se lève en soirée et demeure visible toute la nuit dans la belle constellation des Gémeaux. Jupiter est l'astre nocturne le plus lumineux du ciel après la Lune : impossible de la manquer !



Aspect du ciel le soir du 13, vers minuit. Le radiant (R), le point d'où semblent provenir les météores, se situe dans la constellation des Gémeaux. On remarque la présence de la brillante planète Jupiter.

SATURNE
Lorsque l'obscurité devient complète, la planète aux anneaux se trouve dans la direction du sud, à environ quarante degrés de hauteur. Son éclat stable la distingue des étoiles voisines. Elle se couche avant minuit en fin de mois.

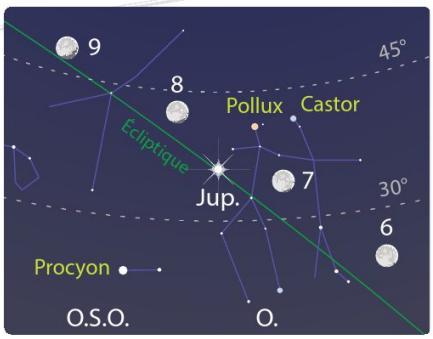
Le retour des Géminides

ENTRE LE 4 ET LE 17 DÉCEMBRE, la Terre traverse le nuage de poussières vraisemblablement laissé par l'astéroïde (3200) Phaéton. Ces minuscules grains, bien plus rapides que les balles d'un fusil, s'enflamment dans l'atmosphère et forment l'une des plus belles pluies d'étoiles filantes de l'année : les Géminides.

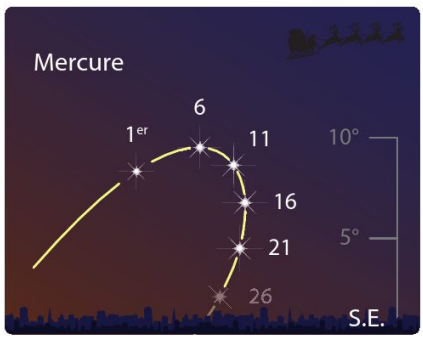
Notre conseil Le maximum d'activité est attendu dans la nuit du 13 au 14. Le dernier quartier ayant eu lieu le 11, la Lune se fera discrète et n'éclairera guère le ciel. Dans un site éloigné des lumières urbaines, installez-vous confortablement. En pleine nuit, vous pourriez observer plusieurs dizaines de météores par heure.

L'appli du mois

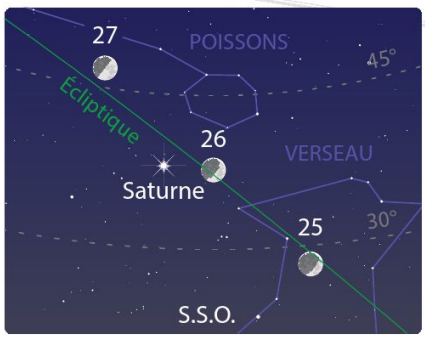
XASTERIA
est une application météo gratuite en français pour iOS conçue pour l'astronomie. Elle fournit la couverture nuageuse, la transparence du ciel et la turbulence (le « seeing ») à partir des données du service 7Timer!. Les cartes sont claires et la localisation mondiale. Simple et précise, elle permet d'anticiper les meilleures nuits d'observation, en France comme ailleurs.



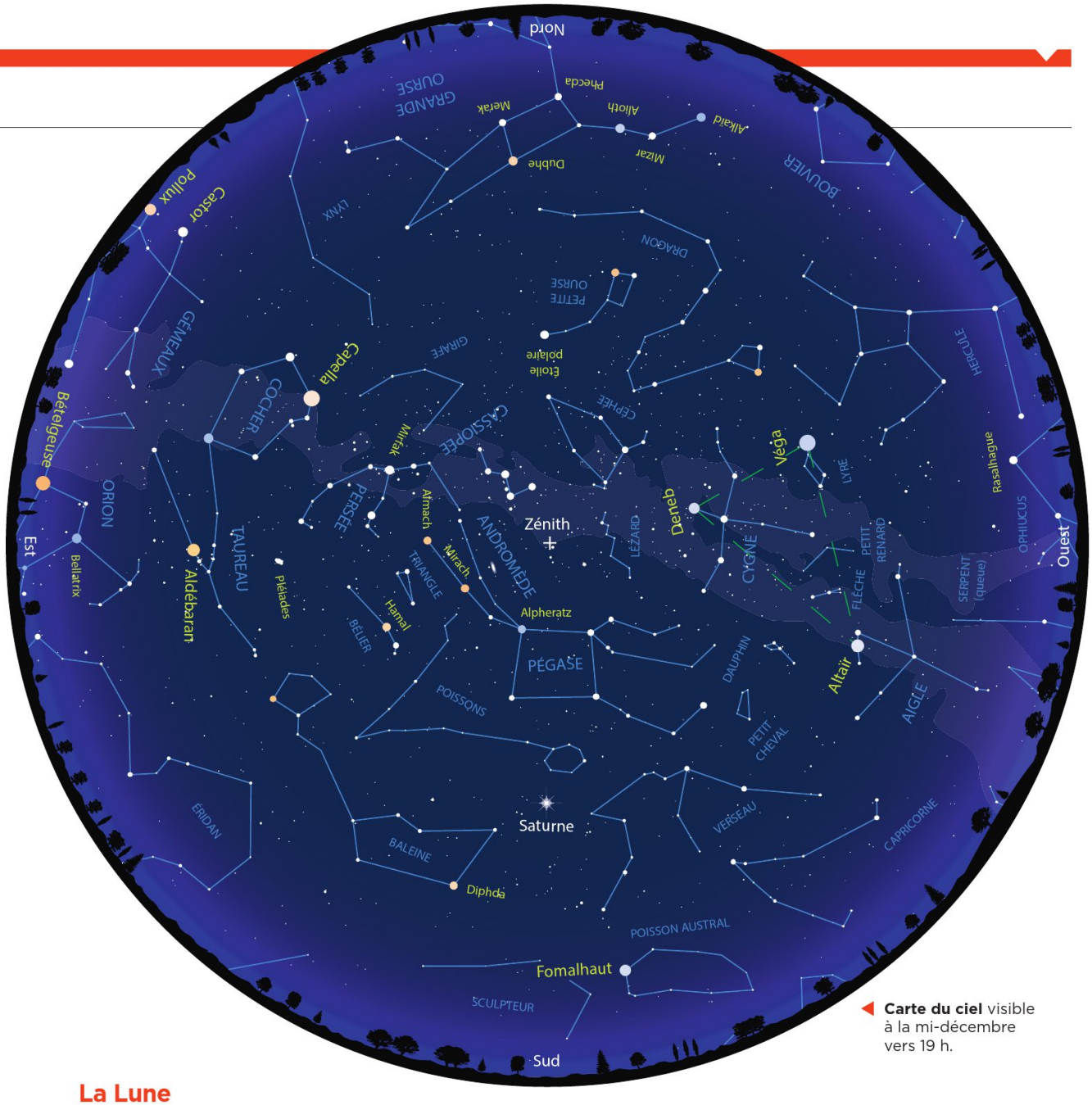
LE 7 ET LE 8, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune en phase gibbeuse décroissante surplombe l'horizon ouest et rend visite à la brillante Jupiter, dans les Gémeaux.



UNE GRANDE PARTIE DU MOIS, Mercure s'offre aux regards dans le ciel de l'aube. Quarante-cinq minutes avant le lever du Soleil, elle brille bas vers l'horizon sud-est.



LE 26, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune au croissant très affirmé croise Saturne aux confins du Verseau et des Poissons, au-dessus de l'horizon sud-sud-ouest.



Carte du ciel visible à la mi-décembre vers 19 h.

La Lune

Pleine Lune :
vendredi 5 à 0 h (la Lune se trouve alors dans la constellation du Taureau)

Dernier quartier :
jeudi 11 à 22 h (Lion)

Nouvelle Lune :
samedi 20 à 3 h (Sagittaire)

Premier quartier :
samedi 27 à 20 h (Poissons)

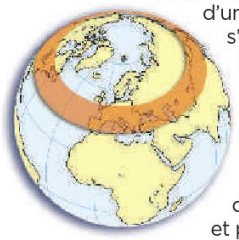
Le Soleil

(à Paris)	Lever	Coucher
1er décembre	8h24	16h55
31 décembre	8h46	17h02

Solstice d'hiver le 21 à 16 h

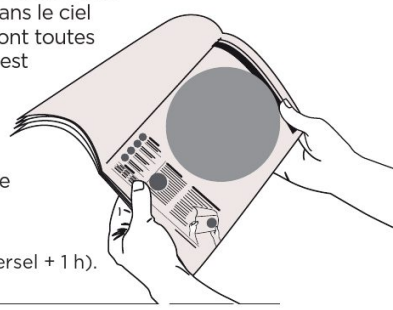
D'où voir le ciel

Notre carte tracée pour une latitude de 47° nord montre le ciel visible en France métropolitaine, et plus largement en Europe et dans le monde, à l'intérieur d'une bande s'étendant de 40 à 54° de latitude nord. Si vous êtes au nord du 47e parallèle, l'étoile Polaire sera plus haute dans votre ciel, et plus basse dans le cas contraire.



Comment utiliser cette carte

Faites tourner votre magazine sur lui-même, de façon que le nom de la direction dans laquelle vous observez soit écrit à l'endroit. Les constellations et les étoiles que vous retrouverez dans le ciel qui vous fait face sont toutes celles dont le nom est lisible sans trop pencher la tête. La position des planètes visibles à l'œil nu est indiquée pour le 15 du mois.



Les heures sont données en heure légale française (temps universel + 1 h).

Suivez-nous au quotidien sur le Web

www.sciencesetavenir.fr

DÉCRYPTAGE

La généalogie génétique au secours des « cold cases »

SPL/SUCRÉ SALÉ

Le ministre de la Justice Gérald Darmanin envisage de recourir aux données de tests génétiques récréatifs dans le cadre d'enquêtes criminelles. Mais en quoi cela consiste précisément ? Explications détaillées en vidéo. sciav.fr/946crim

REPORTAGE

Le premier pôle médical consacré aux diabètes

SCIENCES ET AVENIR

Diabet', un nouveau centre médical réservé à la prise en charge des diabétiques, ouvre ses portes en novembre à Paris. Reportage vidéo sur cette initiative unique en Europe qui doit permettre de désengorger les hôpitaux. sciav.fr/946diabet

Le top 5 du mois

- **Le mystère clinique de la morsure des mambas élucidé**
  sciav.fr/945mamba
- **Intelligence : à quel âge notre cerveau est-il au sommet ?**
  sciav.fr/946intel
- **En Provence, une chasse aux œufs… de dinosaures**
  sciav.fr/946dino
- **Découverte d'un troisième état entre la vie et la mort**
  sciav.fr/946mort
- **Affaire Jubillar : le bornage téléphonique est-il fiable ?**
  sciav.fr/946bornage

SCIENCES ET AVENIR

TWITCH

La science peut-elle sauver le climat ?

Dans le prolongement de notre dossier consacré aux technologies d'atténuation du réchauffement climatique (*S. et A.* n° 945), Laurent Bopp, directeur de recherche au CNRS et spécialiste du cycle du carbone dans l'océan, et Florent Guillou, ingénieur spécialiste du captage de CO_2 dans l'air, sont venus répondre à vos questions en direct sur notre chaîne Twitch. À retrouver en replay sur YouTube. sciav.fr/946climat

LES SUJETS QUI VOUS FONT RÉAGIR

SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX

AFP

AFP

AFP

LinkedIn

Le venin de l'araignée-banane (*Phoneutria nigriventer*) provoque un priapisme chez la personne mordue. Des chercheurs brésiliens s'en sont inspirés pour élaborer un traitement contre les troubles de l'érection. sciav.fr/946banane

Instagram

Une étude montre que les chaussures de course pour femmes, largement fondées sur un design masculin, freinent les performances de ces dernières et augmentent leurs risques de blessure. sciav.fr/946run

Facebook

En stimulant le tonus musculaire du pharynx, une molécule permettrait de réduire les apnées du sommeil et de se passer de l'appareil de ventilation forcée. sciav.fr/946apnee

LAURENCE FERRARI

18H - 19H
PUNCHLINE

Europe 1
LA RADIO LIBRE

Un intérêt **très intéressant.**

5 %, c'est le taux d'intérêt annuel brut de notre Livret +, pendant 3 mois.

Pour toute première ouverture jusqu'au 04/12/2025.
Dans la limite d'un Livret + par personne et 100 000 euros de dépôt.
Taux de base contractuel de 1,60 % en vigueur au 16/08/2025.

fortuneo BANQUE
J'aime ma banque

25 ans

Réservée aux clients majeurs, résidents fiscaux en France, sous réserve du maintien du Livret + jusqu'au 31 décembre 2025. Sous réserve de détenir un compte de dépôt Fortuneo. Les versements nets effectués jusqu'à 100 000 € seront rémunérés au taux annuel brut promotionnel de 5 % pendant 3 mois à compter de la quinzaine suivant la date d'ouverture du Livret +. Au-delà de 100 000 € ainsi qu'à l'issue de la période de bonification de 3 mois, les versements nets seront rémunérés au taux de base contractuel, susceptible de modification selon les Conditions Générales Fortuneo. Délai de rétractation de 14 jours. Les intérêts sont soumis aux prélèvements fiscaux et sociaux. Fortuneo est une marque commerciale d'Arkéa Direct Bank. Société Anonyme à Directoire et Conseil de Surveillance au capital de 89 198 952 euros. RCS Nanterre 384 288 890. Siège social : Tour Trinity - 1 bis place de la Défense 92400 COURBEVOIE. Courtier en assurance n°ORIAS 07 008 441.